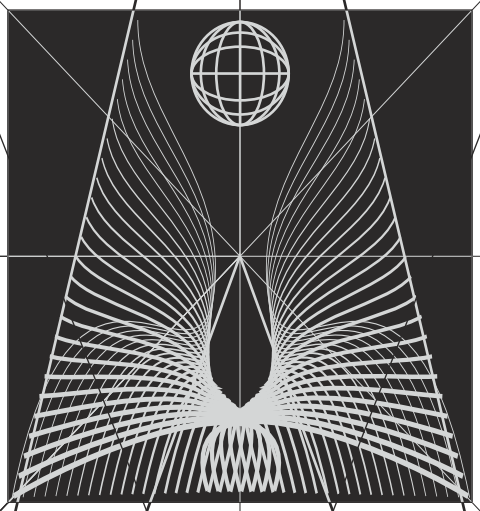
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

МОДЕЛИРОВАНИЕ



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3(31)
2011

© Иркутский государственный университет путей сообщения

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Предисловие издателя

Уважаемые читатели!

Редколлегия журнала представляет очередной выпуск №3(31), продолжая публикации по современным проблемам динамики машин, машиностроения и транспорта. По-прежнему серьезное внимание уделяется поддержке научных исследований, ориентированных на приложение аналитических методов в оценке динамических свойств технических объектов и систем.

Развитие научных контактов послужило основанием для включения в журнал результатов исследований, которые проводятся в вузовских, академических и отраслевых коллективах не только г. Иркутска, региона, но и Дальнего Востока и средней полосы России. Опыт общения с коллегами из других регионов может оказаться полезным во всех отношениях.

Сведения о журнале и контактную информацию можно получить по e-mail: irgups-journal@yandex.ru.

Главный редактор журнала проф., д. т. н. А. П. Хоменко

Предисловие издателя

Адрес редакции: 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15
E-mail: irgups-journal@yandex.ru

Журнал издается с 2004 г.
Периодичность – 4 номера в год.
Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0547 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель: Иркутский государственный университет путей сообщения

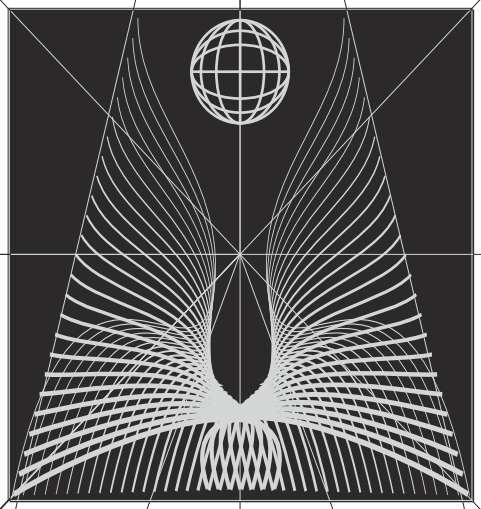
© Иркутский государственный университет путей сообщения

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№3(31)
2011

Редакционная коллегия

А.П. Хоменко, д. т. н., профессор, главный редактор, ректор ИрГУПС
В.Е. Гозбенко, д. т. н., профессор, зам. главного редактора, ИрГУПС
С.В. Елисеев, д. т. н., профессор, засл. деятель науки РФ, зам. главного редактора, ИрГУПС
Б.В. Базаров, член-корр. РАН, председатель президиума Бурятского научного центра СО РАН
С.В. Белокобыльский, профессор, ректор БрГУ
И.В. Бычков, член-корр. РАН, председатель президиума ИФ СО РАН
Н.И. Воропай, член-корр. РАН, директор Института систем энергетики СО РАН
М.И. Кузьмин, академик РАН, директор Института геохимии СО РАН
А.А. Краснощек, к. э. н., начальник ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
Ю.Н. Резник, д. т. н., профессор, ректор ЧГУ

Редакционный совет

А.И. Артюнин, д. т. н., профессор
В.Е. Гозбенко, д. т. н., профессор
С.В. Елисеев, д. т. н., профессор, засл. деятель науки РФ
С.К. Каргапольцев, д. т. н., профессор
Ю.М. Краковский, д. т. н., профессор
А.В. Крюков, д. т. н., профессор
А.В. Лукьянов, д. т. н., профессор
Ю.Ф. Мухопад, д. т. н., профессор
В.А. Начигин, к. т. н., начальник службы технической политики ВСЖД – филиала ОАО «РЖД»
С.И. Носков, д. т. н., профессор
В.А. Подвербный, д. т. н., профессор
И.Ю. Сольская, д. э. н., профессор

Журнал издается с 2004 г.

Ответственный за выпуск В.Е.Гозбенко
Дизайн и макет издания Е.В.Хохрин
Компьютерная верстка А.В. Димов

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Раздел I. Современные технологии. Механика и машиностроение

Хоменко А.П., Елисеев С.В., Ермошенко Ю.В. О соотношении параметров при переходе в механических колебательных системах от соединений «звезда» к соединениям «треугольник» 8

Сидоров Д.Н., Сидоров Н.А., Леонтьев Р.Ю. Асимптотические приближения решений нелинейных краевых задач с векторным параметром в окрестности точки бифуркации 16

Андросов С.П., Браилов И.Г. Аналитическое описание режущих кромок червячной модульной фрезы с закругленной вершиной зубьев 22

Ешенко А.А. Структурные модели движения и давления газов и воздуха в рабочем пространстве стекловаренной печи 26

Иртегов В.Д., Титоренко Т.Н. О дополнительных возможностях метода Рауса–Ляпунова 30

Цвик Л.Б., Зеньков Е.В., Пыхалов А.А. Влияние геометрических параметров плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений на вид их напряженно-деформированного состояния 35

Шигаров А.О., Фёдоров Р.К. Алгоритм обнаружения пустого места на странице документа 42

Курносов Н.Е., Лебединский К.В. Компьютерное моделирование кавитационного процесса в закрученных потоках жидкости 46

Ереско Т.Т., Тубольцев А.А., Ереско С.П., Ереско В.С. Совершенствование конструкций гидропневмоударных агрегатов на основе имитационного моделирования 50

Вансович К.А., Аистов И.П. Критерий оценки скорости роста усталостных трещин в условиях двухосного нагружения 57

Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А. Определение натяга бандажа на ободе колесного центра локомотива 62

Артюнин А.И. Общий метод расчета автобалансировочных устройств роторов машин с большим числом степеней свободы 69

Московских А.О., Савченко А.А., Абросимова Ю.О. Электродинамические связи в механических колебательных системах 73

Шиляев А.И. Определение рациональных условий вытягивания первичных нитей при производстве волокна из базальтового сырья дуплекс-способом 81

Рожкова Е.А., Ильиных В.А. Изготовление образцов и разработка экспериментального стенда для испытания РК-3 профильного соединения на прочность 84

Тюпин В.Н. Влияние взрыва на напряженное состояние горного массива и обделки при сооружении железнодорожных тоннелей 87

Раздел II. Информатика, вычислительная техника и управление. Приборостроение. Метрология. Информационно-измерительные приборы и системы

Краковский Ю.М., Михайлова Е.А. Программное обеспечение многофакторного прогнозирования промышленных загрязняющих выбросов 92

Лемперт А.А., Плетнева А.Э., Фу Фыок Гуй, Казаков А.Л. Моделирование и прогнозирование расхода топлива для специального подвижного состава на ВСЖД 96

Скачков И.В., Бальчугов А.В. Моделирование процесса десорбции на насадке 102

Корсуков А.С. Инструментальные средства полунатурного моделирования распределенных вычислительных систем 104

Наумов И.С. Постановка задачи оптимизации параметров системы обеспечения ресурсами при ликвидации чрезвычайных ситуаций на промышленных объектах 111

Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Динамический контроль автоматов управления технологическими процессами 114

Ревенский А.А., Гозбенко В.Е. Моделирование торцевой зубчатой передачи 119

Володарский В.А. Принципы оптимизации предупредительных замен и ремонтов в условиях неопределенности 124

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии
Системный анализ
Моделирование

СОДЕРЖАНИЕ

Исаев А.И., Сафарбаков А.М., Богданович Д.В., Майрович Ю.И. Импульсная камера сгорания газотурбинного двигателя 130

Васильев А.В., Бальчугов А.В. Разработка новой регулярной насадки с эффектом эжектирования для тепло- и массообменных процессов 135

Молчанова Е.И., Федоров В.В., Щербаков И.В. Методический подход к созданию гибридных экспертных систем как WEB-приложений 139

Яковлев Д.А., Осипова В.Э., Дурнов В.Г. Применение системы нечеткого управления энергообеспечением предприятия 147

Иванов М.С. Компьютерное моделирование влияния сферической аберрации III порядка на построение германиевой линзой инфракрасного излучения 153

Тюпин В.Н., Святецкий В.С. Повышение выхода заданного гранулометрического состава урановой руды при ведении взрывных работ в слоевых заходках 158

Раздел III. Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство

Сидоров О.А., Аркашев А.Е., Ларькин И.В. Моделирование взаимодействия авторегулируемого токоприемника с контактной подвеской 164

Раевский Н.В., Яковлев Д.А., Дурнов В.Г. Выбор оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления 170

Грошева Н.Б., Чанчиков А.С. Дисконтирование социально-экономического результата инновационных проектов на основе ССД 178

Батукова Л.Р. Проблема запуска процесса инновационной модернизации в трудах российских ученых 180

Владимирова О.Н., Дягель О.Ю., Крылова М.В. Качество образования как фактор развития человеческого капитала в контексте формирования инновационной восприимчивости региона 186

Ситников Д.Н., Ульянов Б.А., Семенов И.А., Фереферов М.Ю., Романовский А.А. Моделирование массообмена в дисперсной фазе при экстракции метанола водой из смеси его с гексаном 192

Лоскутова Е.В. Задача формализации и моделирования учебного процесса 198

Доронин С.В., Донцова Т.В. Статистические модели микропрофиля дорог технологического транспорта 202

Обуздина М.В. Термодинамические закономерности сорбционных процессов извлечения нефтепродуктов из промышленных сточных вод 209

Темникова Е.А., Асламова В.С. Автоматизированная система мониторинга учебного процесса 214

Пудалов А.Д. Унифицированная измерительная схема приборов аналитического контроля 220

Кедрин В.С. Алгоритм оценки оптимальной размерности обучающего множества в нейросетевых моделях прогнозирования 224

Массель Л.В., Такайшвили Л.Н., Чинь Куанг Чунг Имитационное моделирование в исследованиях развития угольной промышленности России 232

Матафонов А.А., Бычинский В.А., Руш Е.А. Получение наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта на основе минерального сырья Восточной Сибири 238

Железнов Д.В., Светлакова Е.Н. Статистическое исследование задержек поездов при пропуске через ремонтируемый перегон 244

Ованесян С.С., Черхарова Н.И. Управление затратами и выпуском продукции для достижения требуемого уровня мотивации, зависимого от налоговой политики 248

Комлева Е.В. Геологические, экологические и политические аспекты хранения и захоронения ядерных материалов 254

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

Part I. Modern technologies. Mechanics and mechanical engineering

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko On connection of parameters in mechanical oscillation systems transformation from combination «star» to combination «triangle» 8

D.N. Sidorov, N.A. Sidorov, R.Ju. Leontiev Asymptotic approximations of solutions to nonlinear boundary problems with vector parameter in the neighborhood of bifurcation point 16

S.P. Androsov, I.G. Brailov Analytical description of hob modular cutter with rounded cutting edges 22

A.A. Eshenko Structural models of movement and pressure of gases and air in glass furnace's working space 26

V.D. Irtegov, T.N. Titorenko On additional possibilities of the Routh – Lyapunov method 30

L.B. Tsvik, E.V. Zenkov, A.A. Pikhalov Influence of the geometrical characteristics of plano-cylinder benchmarks with stress concentrators on their stress mode 35

A.O. Shigarov, R.K. Fedorov An algorithm for detection of whitespace on document page 42

N.E. Kurnosov, K.V. Lebedinsky Computer simulation of cavitational process in the twirled streams of the fluid 46

T.T. Eresko, A.A. Tubolcev, S.P. Eresko, V.S. Eresko Hydropneumoblow aggregates construction improvement based on imitating modelling 50

K.A. Vansovich, I.P. Aistov Cracks growth in biaxial conditions estimation criteria 57

A.P. Buinosov, I.M. Pishniy, V.A. Tikhonov Definition bandage tightening on the rim of wheel centers locomotives 62

A.I. Artyunin Total method of accounting of autobalance equipment of rotor of machines with big number of freedom degrees 69

A.O. Moskovskich, A.A. Savchenko, Yu.O. Abrosimova Electrodynamic ties in mechanical oscillation systems 73

A.I. Shilyaev Definition of rational conditions making the fibre from primary threads from basalt mineral raw materials in doublex-process 81

E.A. Rozhkova, V.A. Iliinyh Sample fabrication and experimental stand development for testing RK-3 profile join toughness 84

V.N. Tyupin Explosion effect on the massif stress state during the handling of mining output and railway tunneling 87

Part II. Computer science, computer facilities and management. Instrument making. Metrology. Information-measuring devices and systems

Y.M. Krakovsky, E.A. Mikhaylova The software for multifactor forecast of industrial pollution 92

A.A. Lempert, A.E. Pletneva, Phu Phuoc Huy, A.L. Kazakov Modeling and forecasting of fuel consumption for special rolling stock on the East-Siberian railway 96

I.V. Skachkov, A.V. Balchugov The desorption in the packing layer mathematical modeling 102

A.S. Korsukov Tools for seminatural simulation of distributed computing systems 104

I.S. Naumov Statement of problem of supply of resources system optimization parameters at liquidation of emergency on industrial targets 111

A.U. Mukhopad, U.E Mukhopad The dynamic control of automatic machines of management technological processes 114

A.A. Revenskiy, V.E. Gozbenko Modeling of end cogwheel cession 119

V.A. Volodarsky The principle of preventive replacement and repair optimization subject to indetermination 124

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Modern technologies
System analysis
Modeling

CONTENTS

A.I. Isaev, A.M. Safarbakov, D.V. Bogdanovich, Y.I. Mairovich The gas turbine engine pulse combustor 130

A.V. Vasiliev, A.V. Balchugov Development of a new regular packing with ejection effect for heat and mass transfer processes 135

E.I. Molchanova, V.V. Fedorov, I.V. Shcherbakov Methodical approach to building hybrid expert systems as web-based applications 139

D.A. Yakovlev, V.E. Osipova, V.G. Durnov Application of system of indistinct management of enterprise power supply 147

M.S. Ivanov Computer simulation of the spherical aberration of the III order to build the focused infrared radiation with a germanium lens 153

V.N. Tyupin, V.S. Svyatetsky Capacity raising of machinery rates of uranium ore bulk in conducting blasting in band delivery 158

Part III. The system analysis. Modelling. Transport. Power. Building

O.A. Sidorov, A.E. Arkashev, I.V. Larkin simulation of active control pantograph and catenary interaction 164

N.V. Raevsky, D.A. Yakovlev, V.G. Durnov Time series forecasting of electricity consumption by choosing the optimal method 170

N.B. Grosheva, A.S. Chanchikov Discounting of social and economic result of innovative projects on the basis of SDR 178

L.R. Batukova Problem of start of process of innovative modernization in works of the russian scientists 180

O.N. Vladimirova, O.Ju. Dyagel, M.V. Krylova Quality of formation as the factor of development of the human capital in context of formation of the innovative susceptibility of a region 186

D.N. Sitnikov, B.A. Ulyanov, I.A. Semenov, M.U. Fereferov, A.A. Romanovsky Mass transfer from disperse phase modeling in the methanol extraction from hexane by water 192

E.V. Loskutova Problem of formalization and modelling of educational process 198

S.V. Doronin, T.V. Dontsova Statistical models of technological trasport roads microprofile 202

M.V. Obuzdina Thermodynamic laws of sorption extraction of oil products from industrial waste water 209

E.A. Temnikova, V.S. Aslamova The automated system of studies process 214

A.D. Poudalov Unitized metering circuit of instruments of analytical control 220

V.S. Kedrin Algorithm of evaluation of the optimum dimensions of training set in neural forecasting models 224

L.V. Massel, L.N. Takayshvili, Trinh Quang Trung Simulation in investigation of development of Russian coal industry 232

A.A. Matafonov, V.A. Bychinskiy, E.A. Rush Opportunities of creating spot welding electrode for branching junction and component parts restoration on the railway transport (based on the Eastern Siberia mineral raw material) 238

D.V. Zheleznov, E.N. Svetlakova A statistical research of train delays when skipping through the coupe reconstructed 244

S.S. Ovanesyan, N.I. Cherkharova Management of cost and release products to achieve the required level of motivation, depending on the tax policy 248

E.V. Komleva The phenomenon of nuclear energy: spiritual-humanitarian-pragmatic view 254

Уважаемые коллеги! Мы приглашаем вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации

Статья представляется в электронном и распечатанном виде. Рекомендуемый объем статьи до 8 стр.

1. К статье прилагаются:

!1) акт экспертизы; внешний отзыв;

!2) индекс УДК;

!3) сведения об авторах: **фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность**, название учреждения (кафедры), контактный телефон или e-mail;

!4) аннотация по образцу (**на русском и английском языках**):

УДК 621.879

Иванов И.И., Петров П.П. Совершенствование систем разработки угольных месторождений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 1 (21). С. __–__. Рис. 5. Табл. 2. Библиогр.: С. __ (9 назв.).

Рассмотрены способы разведки ...

Ключевые слова: месторождение, выработка, скважина.

UDC 621.879

Ivanov I.I., Petrov P.P. Improvement of systems of working out coal deposits // The modern technologies. The system analysis. The modelling. 2009. # 1 (21). P. __–__. Fig. 5. Tab. 2. Ref. 9.

Ways of investigation of deposits are considered ...

Keywords: deposit, development, chink.

Количество знаков в реферате – не более 400.

Индекс УДК, сведения об авторах и аннотация предоставляются в виде файла с расширением *.doc.

2. **Текст статьи предоставляется в виде файла с расширением *.doc** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий, **и распечаткой** на стандартных листах формата А4 (210×297 мм) в две колонки, заверенной подписью авторов.

При наборе статьи в Microsoft Word с учетом формата издания рекомендуются следующие установки:

- параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2,5 см;** слева и справа – **1,75 см; табуляция – 2 см;** ориентация – книжная;
- шрифт – **Times New Roman,** размер – 11, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- **текст статьи разбивается в две колонки с помощью команды «Форматирование -> Колонки» со следующими параметрами: ширина колонки – 8,5 см, промежуток – 0,5 см.**
- при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются ***курсивом;*** для греческих букв и символов назначать шрифт Symbol, для остальных элементов – шрифт **Times New Roman** (использование букв русского алфавита в формуле нежелательно). Размер символов: обычный – 11 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 11 пт. Все экспликации элементов формул в тексте также необходимо выполнять в виде формул.

3. **Рисунки,** вставленные в текст статьи, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина – 150 мм, высота – 245 мм, представлены **на компакт-диске** в виде файла с расширением *.bmp, *.tif **и распечаткой** на стандартных листах формата А4, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel, с приложением файлов.

4. **Библиографический список** к статье оформляется **в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления».**

5. С аспирантов плата за публикацию рукописей не взимается.

6. Все материалы должны быть представлены в редакцию **на компакт-диске,** проверенном на отсутствие вирусов.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться:

г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15. Офис А-101. Иркутский государственный университет путей сообщения.
Телефоны: **(8-3952) 63-83-89.** Факс: **(8-3952) 38-76-72.** E-mail: **irgups-journal@yandex.ru.**
Гозбенко Валерий Ерофеевич

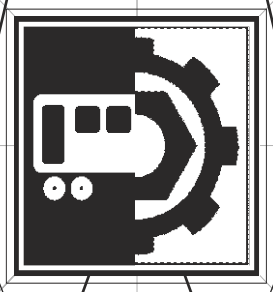
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 1.
Современные технологии.
Механика и машиностроение

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 62.752

Хоменко Андрей Павлович,
д-р техн. наук, проф., ректор ИрГУПС
тел.: (3952) 638-311, e-mail: homenko@irgups.ru
Елисеев Сергей Викторович,
д-р техн. наук, профессор, директор НИИ СТСАМ
тел.: (3952) 59-84-28, e-mail: eliseev_s@inbox.ru
Ермошенко Юлия Владимировна,
канд. техн. наук, доцент, декан факультета заочного обучения
e-mail: ermosh_emf@irgups.ru

О СООТНОШЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ В МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ОТ СОЕДИНЕНИЙ «ЗВЕЗДА» К СОЕДИНЕНИЯМ «ТРЕУГОЛЬНИК»

A.P. Khomenko, S.V. Eliseev, Yu.V. Ermoshenko

ON CONNECTION OF PARAMETERS IN MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS TRANSFORMATION FROM COMBINATION «STAR» TO COMBINATION «TRIANGLE»

Аннотация. *Рассматриваются вопросы построения математических моделей механических колебательных систем в структурах соединений типов «звезда» и «треугольник». Предлагается метод для получения эквивалентных соотношений между параметрами. Рассматривается ряд примеров.*

Ключевые слова: *эквивалентные преобразования виброзащитных систем, соединения элементов механических систем, соединения типов «звезда», «треугольник».*

Abstract. *Questions of creating mathematical models of mechanical oscillation systems in structures of «star» and «triangle» connection types of are considered. Methods for getting of equivalent correlation between parameters are offered. Several examples are shown.*

Keywords: *equivalent transformations of vibroprotection systems, connections of elements of mechanical systems, connection of type «star» and «triangle».*

Введение

При преобразованиях расчетных и структурных схем механических колебательных систем, в частности при рассмотрении задач динамического гашения с двумя массами, упруго связанными между собой, предметом изучения становятся непланарные цепи. Получение компактных выражений для передаточных функций цепей обратной связи можно обеспечить, используя эквивалентные преобразования. Отдельные результаты по названной проблеме приводились в работах [1÷3].

I. Постановка задачи

Рассмотрим расчетную схему (рис. 1, *а, б*), на которой показаны механические колебательные системы типа «звезда» (рис. 1, *а*) и «треугольник» (рис. 1, *б*). В качестве возмущающих факторов выступают колебания основания.

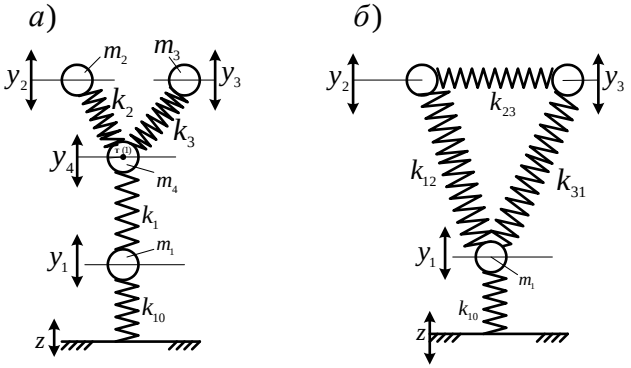


Рис. 1. Принципиальные расчетные схемы соединений типа «звезда» (*а*) и «треугольник» (*б*)

Представленные на рис. 1, *а, б* схемы отражают только вертикальные движения при отсутствии сил сопротивления. На рис. 1, *а, б* приняты обозначения: z – кинематическое возмущение; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты жесткости пружин в соединении «звезда»; k_{12}, k_{23}, k_{31} – коэффициенты жесткости пружин для соединения типа «треугольник»; k_{10} – коэффициент жесткости упругого

элемента, связывающего массу m_1 с основанием; m_1, m_2, m_3 – массоинерционные элементы.

Расчетные схемы на рис. 1, *а, б* носят принципиальный характер, что отражается в изображениях наклонов пружин; на самом деле все колебания происходят по вертикали и траектории движения элементов m_1, m_2, m_3 располагаются на одной вертикальной линии. По существу, в представленной работе предлагается вариант доказательства теоремы о возможности построения эквивалентных соотношений на основе специальных приемов составления математических моделей и использования некоторых предположений.

1. Для упрощения процедур определения приведенных жесткостей в схеме на рис. 1, *а* может быть введена промежуточная масса m_4, которая движется, имея координатой y_4. В дальнейшем принимается, что $m_4 = 0$, что позволяет вернуться в класс систем с тремя степенями свободы.

2. Полюсом схемы «звезда» является элемент массой m_4, который затем представляется точкой (1) при $m_4 = 0$.

3. Поскольку преобразования носят эквивалентный характер (отыскиваются соотношения между k_{12}, k_{23}, k_{31} и k_1, k_2, k_3), то при обоих видах соединений кинетическая и потенциальная энергия при рассмотрении движения в статусе трехмассовой системы должны сохраняться неизменными.

II. Свойства соединения элементов по типу «звезда»

Рассмотрим соединение типа «звезда» (рис. 1*а*) полагая, что кинетическая и потенциальная энергия системы имеют вид

$$T = \frac{1}{2}m_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}m_2\dot{y}_2^2 + \frac{1}{2}m_3\dot{y}_3^2 + \frac{1}{2}m_4\dot{y}_4^2, \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{2}k_{10}(y_1 - z)^2 + \frac{1}{2}k_1(y_4 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_4)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_3 - y_4)^2. \quad (2)$$

Полагаем, что

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_1} = m_1\dot{y}_1;\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_2} = m_2\dot{y}_2;\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_3} = m_3\dot{y}_3;\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_4} = m_4\dot{y}_4;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_1} = k_{10}y_1 - k_{10}z + k_1y_1 - k_1y_4;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_2} = k_2y_2 - k_2y_4;\ \frac{\partial \Pi}{\partial y_3} = k_3y_3 - k_3y_4;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial y_4} = k_1y_4 - k_1y_1 + k_2y_4 - k_2y_2 + k_3y_4 - k_3y_3,$$

тогда система дифференциальных уравнений движения примет вид

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_{10} + k_1) - k_1y_4 = k_{10}z, \quad (3)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + k_2y_2 - k_2y_4 = 0, \quad (4)$$

$$m_3\ddot{y}_3 + k_3y_3 - k_3y_4 = 0, \quad (5)$$

$$-k_1y_1 - k_2y_2 - k_3y_4 + m_4\ddot{y}_4 + y_4(k_1 + k_2 + k_3) = 0. \quad (6)$$

Примем в уравнении (6), что $m_4 = 0$, тогда получим

$$y_4 = \frac{k_1y_1 + k_2y_2 + k_3y_3}{k_1 + k_2 + k_3}. \quad (7)$$

Подставим (7) в уравнения (3)÷(5); коэффициенты уравнений системы в координатах y_1, y_2, y_3 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнений (3)÷(5) в координатах y_1, y_2, y_3 («звезда»)

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1p^2 + k_{10} + \frac{k_1(k_2+k_3)}{a}$	$\frac{-k_2k_1}{a}$	$\frac{-k_1k_3}{a}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$\frac{-k_2k_1}{a}$	$m_1p^2 + \frac{k_2(k_1+k_3)}{a}$	$\frac{-k_2k_3}{a}$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$\frac{-k_1k_3}{a}$	$\frac{-k_2k_3}{a}$	$m_3p^2 + \frac{k_3(k_1+k_2)}{a}$
Q_1	Q_2	Q_3
k_1z	0	0

Примечание: Q_1, Q_2, Q_3 – обобщенные силы в системе.

III. Математическая модель соединения типа «треугольник»

Для соединения типа «треугольник» (рис. 1, *б*) можно провести аналогичные выкладки, полагая, что кинетическая энергия имеет вид (1) при $m_4 = 0$, а потенциальная – может быть представлена в виде:

$$\Pi = \frac{1}{2}k_{10}(y_1 - z)^2 + \frac{1}{2}k_{12}(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_{23}(y_2 - y_3)^2 + \frac{1}{2}k_{13}(y_3 - y_1)^2. \quad (8)$$

Сделаем ряд промежуточных выкладок и запишем уравнения движения для схемы на рис. 1, *б* как соединения типа «треугольник»:

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_{10} + k_{12} + k_{13}) - y_2(k_{12}) - y_3k_{13} = k_{10}z, \quad (9)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_{12} + k_{23}) - y_1k_{12} - k_{23}y_3 = 0, \quad (10)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_{12} + k_{23}) - k_{12}y_1 - k_{23}y_3 = 0, \quad (11)$$

В табл. 2 приведены коэффициенты уравнений (9)÷(11) для системы присоединений «треугольник».

Таблица 2

Коэффициенты уравнений (9)÷(11) в соединении типа «треугольник»

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1 p^2 + k_{10} + k_{12} + k_{13}$	$-k_{12}$	$-k_{13}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$-k_{12}$	$m_1 p^2 + k_{12} + k_{23}$	$-k_{23}$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-k_{13}$	$-k_{23}$	$m_3 p^2 + k_{23} + k_{13}$
Q_1	Q_2	Q_3
$k_{10} z$	0	0

В основу метода преобразования, как это было показано в работе [4], положена процедура предварительного увеличения числа степеней свободы системы с соединением типа «звезда» с привлечением дополнительной массы m_4. После принятия $m_4 = 0$ и выравнивания размерностей матриц можно сопоставить две системы уравнений (3)÷(5) и (9)÷(11). Сопоставление правомерно при учете такого обстоятельства, как неизменность системы координат и кинетической энергии.

Что касается значений потенциальной энергии, то можно предполагать, что при эквивалентных преобразованиях должны остаться равными и потенциальные энергии. Запишем выражение для потенциальной энергии для соединения типа «треугольник».

$$П = \frac{1}{2}k_{10}(y_1 - z)^2 + \frac{1}{2}k_{12}(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_{23}(y_3 - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_{13}(y_3 - y_1)^2. \quad (12)$$

В этом случае могут быть найдены коэффициенты при переменных (12) y_1, y_2, y_3:

- при y_1^2 получим $k_{12} + k_{13} + k_{10}$; (13)
- при y_2^2, соответственно, $k_{12} + k_{23}$; (14)
- при y_3^2 найдем $k_{13} + k_{23}$; (15)
- при $y_1 y_2$ имеем k_{12}; (16)
- при $y_2 y_3$ имеем k_{23}; (17)
- при $y_1 y_3$ имеем k_{13}. (18)

Запишем аналогичные соотношения для соединения типа «звезда», полагая, что $y_4 = (k_1 y_1 + k_2 y_2 + k_3 y_3)/a$, где $a = k_1 + k_2 + k_3$. Таким образом, аналогично вышеприведенному получим:

- при y_1^2 $k_{10} + \frac{k_1(k_2 + k_3)^2}{a^2} + \frac{k_2 k_1^2}{a^2} + \frac{k_3 k_1^2}{a^2}$; (19)
- при y_2^2 $\frac{k_1 k_2^2}{a^2} + \frac{k_2(k_1 + k_3)^2}{a^2} + \frac{k_3 k_2^2}{a^2}$; (20)
- при y_3^2 $\frac{k_3(k_1 + k_2)^2}{a^2} + \frac{k_2 k_3^2}{a^2} + \frac{k_1 k_3^2}{a^2}$; (21)
- при $y_1 y_2$ $-\frac{k_1 k_2}{a}$; (22)
- при $y_2 y_3$ $-\frac{k_3 k_2}{a}$; (23)
- при $y_1 y_3$ $-\frac{k_1 k_3}{a}$. (24)

Сопоставляя (13÷18) и (19)÷(24), получим систему соотношений:

$$k_{12} + k_{13} = k_1 k_2 + \frac{k_3(k_1 k_3 + k_2 k_3 + k_2^2)}{a^2}; \quad (25)$$

$$k_{12} + k_{23} = \frac{k_1 k_3}{a} + \frac{k_3(k_1 k_2 + k_1 k_3 + k_2^2)}{a^2}; \quad (26)$$

$$k_{13} + k_{23} = k_1 k_3 + \frac{k_3(k_2 k_3 + k_2 k_1 + k_2^2)}{a^2}; \quad (27)$$

$$k_{12} = \frac{k_1 k_2}{a}; \quad (28)$$

$$k_{23} = \frac{k_2 k_3}{a}; \quad (29)$$

$$k_{13} = \frac{k_1 k_3}{a}; \quad (30)$$

Из представленных выше выражений можно предположить, что при известных параметрах «звезды» k_1, k_2 и k_3 могут быть определены параметры «треугольника» k_{12}, k_{13}, k_{23}.

Используя вышеприведенный подход, можно также решить задачу о построении из *n*-лучевой «звезды» – *n*-стороннего многоугольника.

III. Переход от соединения типа «треугольник» к соединению «звезда»

Для дальнейших расчетов используем понятие податливости, полагая, что $s = 1/k$, то есть податливость является обратной величиной по отношению к коэффициенту жесткости пружины. Преобразуем (28), принимая

$$k_{12} = \frac{1}{s_{12}}, k_1 = \frac{1}{s_1}, k_2 = \frac{1}{s_2}, k_3 = \frac{1}{s_3},$$

тогда

$$\frac{1}{s_{12}} = \frac{\frac{1}{s_1}\cdot\frac{1}{s_2}}{\frac{1}{s_1}+\frac{1}{s_2}+\frac{1}{s_3}} = \frac{\frac{1}{s_1 s_2}}{\frac{s_2 s_3 + s_1 s_3 + s_1 s_2}{s_1 s_2 s_3}} = \frac{s_1 s_2 s_3}{s_1 s_2 (s_2 s_3 + s_1 s_3 + s_1 s_2)}. \quad (31)$$

Из (31) следует, в частности, что

$$s_{12} = \frac{(s_1 s_2 + s_2 s_3 + s_1 s_3) s_1 s_2}{s_1 s_2 s_3}, \quad (32)$$

Примем, что

$$s_1 s_2 + s_1 s_3 + s_2 s_3 = a_1, \quad (33)$$

тогда

$$s_3 = \frac{a_1}{s_{12}},\ s_2 = \frac{a_1}{s_{13}},\ s_1 = \frac{a_1}{s_{23}}. \quad (34)$$

Подставляя (34) в a_1, получим

$$a_1 = \frac{a_1^2}{s_{12} s_{13}} + \frac{a_1^2}{s_{12} s_{23}} + \frac{a_1^2}{s_{13} s_{23}},$$

или

$$a_1 = \frac{s_{12} s_{13} s_{23}}{s_{12} + s_{13} + s_{23}}. \quad (35)$$

Используя (35), можно найти, что:

$$s_1 = \frac{s_{12} s_{13}}{s_{12} + s_{23} + s_{13}}, \quad (36)$$

$$s_2 = \frac{s_{12} s_{23}}{s_{12} + s_{23} + s_{13}}, \quad (37)$$

$$s_3 = \frac{s_{23} s_{31}}{s_{12} + s_{23} + s_{13}}. \quad (38)$$

Делая ряд преобразований, окончательно получим

$$k_1 = k_{12} + k_{13} + \frac{k_{12} k_{13}}{k_{23}}, \quad (39)$$

$$k_2 = k_{12} + k_{23} + \frac{k_{12} k_{23}}{k_{13}}, \quad (40)$$

$$k_3 = k_{23} + k_{13} + \frac{k_{23} k_{13}}{k_{12}}. \quad (41)$$

Таким образом, зная значения k_{12}, k_{23}, k_{13}, можно, используя определенные приемы преобразований, найти соответствующие выражения для определения параметров соединения типа «звезда»: k_1, k_2, k_3.

Отметим, что преобразование «звезды» в «треугольник» производилось путем введения в расчетную схему (рис. 1, *а*) дополнительной массы m_4 и соответствующей координаты точки (1) – y_4. В последующем принималось, что $m_4 = 0$, а y_4, в конечном итоге, приняло вид (7). Такой прием использовался при выводе уравнений движения для механических колебательных систем с сочленениями, что было приведено в работе [4].

Для дальнейших исследований динамических свойств механических систем значение представляет соединение элементов по типу «звезда – треугольник» (рис. 2).

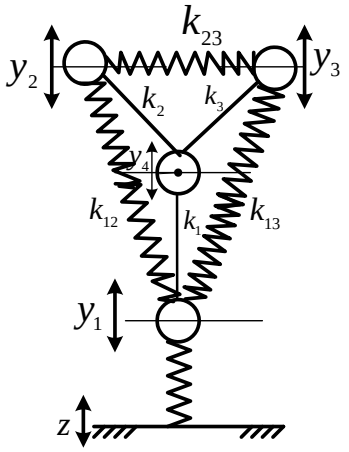


Рис. 2. Принципиальная расчетная схема для механической системы типа «звезда – треугольник»

Кинетическая энергия системы определяется выражением (1); потенциальная энергия запишется в виде

$$\Pi = \frac{1}{2}k_{10}(y_1 - z)^2 + \frac{1}{2}k_{12}(y_2 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_1(y_4 - y_1)^2 + \frac{1}{2}k_{23}(y_3 - y_2)^2 + \frac{1}{2}k_2(y_2 - y_4)^2 + \frac{1}{2}k_3(y_3 - y_4)^2 + \frac{1}{2}k_{13}(y_3 - y_1)^2. \quad (42)$$

Производя ряд выкладок, запишем систему дифференциальных уравнений движения в координатах $y_1 \div y_4$ следующим образом:

$$m_1\ddot{y}_1 + y_1(k_{10} + k_{12} + k_1 + k_{13}) + y_2(-k_{12}) + y_3(-k_{13}) + y_4(-k_1) = k_1 z_1, \quad (43)$$

$$m_2\ddot{y}_2 + y_2(k_{12} + k_{23} + k_2) + y_1(-k_{12}) + y_3(-k_{23}) + y_4(-k_2) = 0, \quad (44)$$

$$m_3\ddot{y}_3 + y_3(k_{23} + k_3 + k_{13}) + y_1(-k_{13}) + y_2(-k_{13}) + y_2(-k_{23}) + y_4(-k_3) = 0, \quad (45)$$

$$m_4\ddot{y}_4 + y_4(k_1 + k_2 + k_3) + y_1(-k_1) + y_2(-k_2) + y_3(-k_3) = 0. \quad (46)$$

Коэффициенты уравнений (43)÷(46) приведены в табл. 3.

Полагая, что $m_4 = 0$, сделаем ряд преобразований. Результаты представлены в табл. 4, в которой принято, что $m_4 = 0$, а координата y_4 исключена. Последнее уменьшает число степеней свободы системы на рис. 2 до трех.

Таблица 3

Коэффициенты уравнений (43)÷(46) (схема по рис. 2)

a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
$m_1p^2+k_{10}+$ $+k_1+k_{12}+k_{13}$	$-k_{12}$	$-k_{13}$	$-k_1$
a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}
$-k_{12}$	$m_2p^2+k_2+k_{12}+k_{23}$	$-k_{23}$	$-k_2$
a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{34}
$-k_{13}$	$-k_{23}$	$m_3p^2+k_3+k_{23}+k_{13}$	$-k_3$
a_{41}	a_{42}	a_{43}	a_{44}
$-k_1$	$-k_2$	$-k_3$	$m_4p^2+k_1+k_2+k_3$
Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
k_1z	0	0	0

Примечание: $Q_1 \div Q_4$ *– обобщенные силы системы.*

В табл. 4 (позиции a_{12}, a_{13}, a_{23}) наглядно отражаются связи между параметрами систем обоих типов соединений.

В задачах виброзащиты и виброизоляции соединение «звезда» имеет вид, показанный на рис. 1, *а*, что предполагает соединение элемента массой m_1 через пружину с коэффициентом жесткости k_{10}. Однако возможна и такая ситуация, когда элемент массой m_4 также будет иметь связь с основанием через пружину с жесткостью k_4: при этом основание будет иметь закон движения $z_4(t)$.

Тогда система уравнений (43)÷(46) изменится. В этом случае уравнения (43)÷(45) сохраняются, а уравнение (46) примет вид

$$m_4\ddot{y}_4 + y_4(k_1+k_2+k_3+k_4) - \\ -y_1k_1 - k_2y_2 - k_3y_3 = k_4z_4. \qquad (47)$$

Если принять, что $m_4 = 0$, то

$$y_4 = \frac{y_1k_1 + y_2k_2 + y_3k_3 + k_4z_4}{k_1+k_2+k_3+k_4}. \qquad (48)$$

В табл. 5 приведены коэффициенты уравнений системы вида «звезда» с учетом внешнего воздействия z_4. Отметим, что силовое возмущение в виде силового фактора k_4z, приложенного в точке (1), приводит к существенным изменениям правых частей системы уравнений (43)÷(46).

Различие в коэффициентах $a_{ij}\,(i=\overline{1,3},\ j=\overline{1,3})$ в табл. 1 и 5 существует и связано с появлением дополнительного члена – k_4. Что касается обобщенных сил Q_1, Q_2, Q_3, то они также изменяются: при возмущении z_4 внешнее воздействие передается на все элементы. Если принять $k_4 = 0$, то

Таблица 4

Значения коэффициентов в системе уравнений для расчетной схемы на рис. 2

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1p^2+k_{10}+k_1+k_{12}+k_{13}-\frac{k_1^2}{a}$	$-k_{12}-\frac{k_1k_2}{a}$	$-k_{13}-\frac{k_1k_3}{a}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$-k_{12}-\frac{k_1k_2}{a}$	$m_2p^2+k_{12}+k_{23}+k_2-\frac{k_2^2}{a}$	$-k_{23}-k_2k_3$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$-k_{13}-\frac{k_3k_1}{a}$	$-k_{23}-\frac{k_2k_3}{a}$	$m_3p^2+k_{23}+k_{13}+k_3-\frac{k_3^2}{a}$
Q_1	Q_2	Q_3
k_1z	0	0

Таблица 5

Значения коэффициентов уравнений для соединения «звезда» с внешним возмущением z_4

a_{11}	a_{12}	a_{13}
$m_1 p^2 + k_{10} + \dfrac{k_1 (k_2 + k_3 + k_4)}{a_2}$	$\dfrac{-k_1 k_2}{a_2}$	$\dfrac{-k_1 k_3}{a_2}$
a_{21}	a_{22}	a_{23}
$\dfrac{-k_3 k_1}{a_2}$	$m_2 p^2 + \dfrac{k_2 (k_1 + k_3 + k_4)}{a_2}$	$\dfrac{-k_2 k_3}{a_2}$
a_{31}	a_{32}	a_{33}
$\dfrac{-k_3 k_1}{a_2}$	$\dfrac{-k_3 k_2}{a_2}$	$m_3 p^2 + \dfrac{k_3 (k_1 + k_2 + k_4)}{a_2}$
Q_1	Q_2	Q_3
$k_1 z_1 + \dfrac{k_1 k_4 z_4}{a_2}$	$\dfrac{k_4 k_2 z_4}{a_2}$	$\dfrac{k_4 k_3 z_4}{a_2}$

табл. 1 и 5 становятся идентичными.

Сравнивая табл. 1 и 2, отметим, что учет внешнего возмущения при приложении $k_4 z_4$ к точке (1) также позволяет получить ряд соотношений:

$$k_{12} = \frac{k_1 k_2}{a_2}; \tag{49}$$

$$k_{23} = \frac{k_2 k_3}{a_2}; \tag{50}$$

$$k_{13} = \frac{k_1 k_3}{a_2}; \tag{51}$$

$$k_{12} + k_{13} = \frac{k_1 (k_2 + k_3 + k_4)}{a_2}; \tag{52}$$

$$k_{23} + k_{12} = \frac{k_2 (k_1 + k_3 + k_4)}{a_2}; \tag{53}$$

$$k_{23} + k_{13} = \frac{k_3 (k_1 + k_2 + k_4)}{a_2}. \tag{54}$$

Использование выражения (49)÷(51) дает возможность выразить k_{12}, k_{13}, k_{23} через параметры жесткости k_1, k_2, k_3, k_4, то есть учет внешнего фактора, привносящего в структуру механической колебательной системы пружины k_4, не препятствует получению из трехлучной «звезды» соединения типа «треугольник».

Если $k_4 = 0$, то $a = k_1 + k_2 + k_3$, и задача решается с получением выражений k_{12}, k_{13}, k_{23} через параметры «звезды» k_1, k_2, k_3, а такие k_1, k_2, k_3 можно определить через k_{12}, k_{23}, k_{13}. В случае, когда $k_4 \neq 0$, возникает ситуация, при которой можно определить параметры «треугольника», но нельзя однозначно выразить k_{12}, k_{13}, k_{23} через k_1, k_2, k_3 и k_4. Такая ситуация обсуждается, например, в работе [2].

Вопросы передачи возмущения в систему через точку соединения упругих элементов в предположении, что точка соединения пружин не обладает массой, можно отнести к числу еще малоизученных, хотя в практике такие ситуации встречаются достаточно часто. Отметим также, что конфигурацию системы по типу «звезда» при присоединении в точке (1) (рис. 1, *а*) некоторого дополнительного звена можно считать изменением исходной структуры. Другая ситуация возникает, когда в точке (1) (рис. 1, *а*) прикладывается внешняя сила, тогда можно считать, что дополнительный упругий элемент вроде бы и не присоединяется, но координату точки (1) в связи с приложением силы исключить не удается. Во всяком случае, необходимо сформировать некоторое условие связи или определения k_4 через k_1, k_2, k_3.

V. Возможности переноса сил

Рассмотрим вопрос о приложении силы к точке соединения пружин с жесткостями k_1 и k_2, как показано на рис. 3, *а,б,в.*

Если при $k_3 = 0$ сила находится в точке (1), то в статическом состоянии смещение в точке (1) будет равно

$$y_1 = \frac{Q}{k_1}. \tag{55}$$

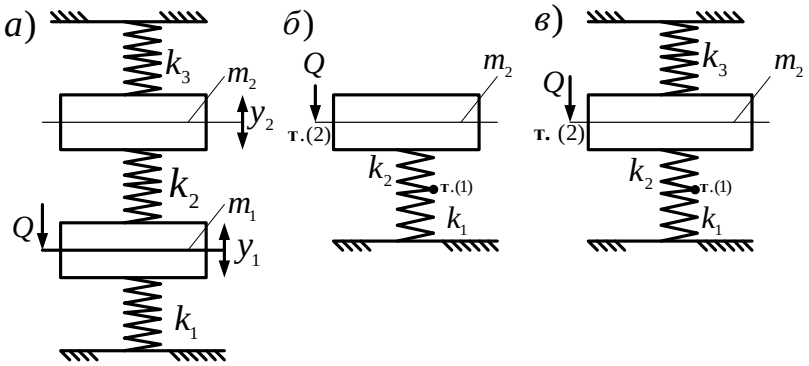


Рис. 3. Расчетные схемы системы с двумя степенями свободы и их трансформации:
а) схема общего вида ($m_1 \neq 0, m_2 \neq 0, k_1 \neq 0, k_2 \neq 0, k_3 \neq 0$);
б) введение последовательного соединения пружин ($m_1 = 0, k_3 = 0$);
в) учет дополнительной связи ($m_4 = 0, k_3 \neq 0$)

Смещение верхней массы (точка (2)) будет таким же, что и в точке (1). Будем полагать, что сила Q может быть перемещена в точку (2), обозначим силу через Q_1, полагая, что при переносе смещения точки (1) останется прежним. Тогда при действии силы Q_1 смещение точки (2) должно быть равно y_1, определяемому из (55), однако смещение будет определяться (рис. 3, *б*) уже с учетом последовательного соединения k_1 и k_2. Тогда $\dfrac{Q}{k_1} = \dfrac{Q_1}{\dfrac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}}$, откуда $Q_1 = \dfrac{k_2}{k_1 + k_2} Q.$

Аналогичный результат можно получить, производя преобразования структурных схем, эквивалентных в динамическом отношении расчетным схемам механических систем на рис. 3, *а* и 3, *б*. Таким образом, если сила Q прикладывается не к массе, а к точке (1), то есть к точке последовательного соединения пружин k_1 и k_2, то силу Q можно перенести на массу m_2 (точка (2)), однако при этом получаемая сила Q_1 уже не будет равна Q: произойдет изменение силы. При преобразованиях должно соблюдаться условие, которое заключается в следующем. Перенос силы из точки (1) в точку (2) сопровождается изменением силы, но при ее приложении в точке (2) смещение в точке (1) не должно измениться. Рассмотрев случай, соответствующий рис. 3*в* (в этом случае $k_3 \neq 0$), найдем, что выполняется условие

$$\frac{Q}{k_1} = \frac{Q_1}{\dfrac{k_1 k_2}{k_1 + k_2} + k_3}. \qquad (56)$$

Таким образом, в общем случае (рис. 3, *в*) при переносе Q из точки (1) в точку (2) имеем

$$Q_1 = \frac{Q\left[(k_1 + k_2) + k_1 k_3 + k_2 k_3\right]}{k_1 (k_1 + k_2 + k_3)} = \frac{k_1 (k_2 + k_3)}{k_1 + k_2 + k_3}.$$

Заключение

Если рассмотреть механические колебательные системы в целом, имея в виду возможности их эквивалентного преобразования, то подход, основанный на учете тождества систем дифференциальных уравнений, представляется наиболее простым. В качестве соблюдаемых условий можно выделить по крайней мере два: равенство в соединениях двух типов кинетических энергий и равенство потенциальных энергий.

Разные виды внешних воздействий приводят к разным математическим моделям. Если силовые факторы прикладываются непосредственно к элементам системы, обладающим массами, то ситуация сохраняется при преобразованиях. В таких случаях структура соединения, например для «треугольника», в общем случае имеет вид, как показано на рис. 4.

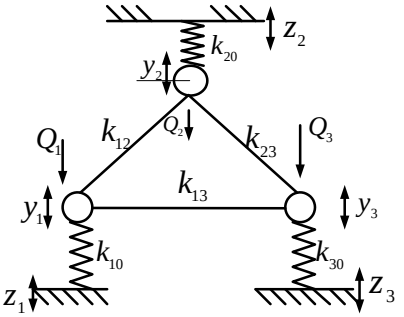


Рис. 4. Расчетная схема механической системы типа «треугольник»

На рис. 4 представлен наиболее общий случай, когда все внешние возмущения либо приложены, либо могут быть простыми приемами связаны с массоинерционными элементами. В частности, при использовании структурных подходов, опирающихся на обобщенные представления сил,

кинематическое и силовое возмущения могут быть приведенными друг к другу [5].

В соединениях типа «звезда» внешние воздействия учитываются аналогично тому, как это делается и для соединений типа «треугольник». Однако системы отличаются тем, что «звезда» имеет особую точку-полюс (точка (1) на рис. 1, *а*). Если внешнее воздействие прикладывается к этой точке, то возможны варианты. На рис. 5 показана принципиальная схема внешних воздействий соединения типа «звезда».

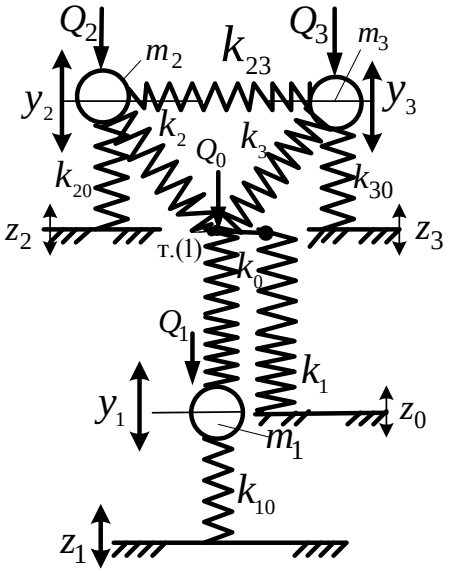


Рис. 5. Принципиальная схема внешних воздействий на систему типа «звезда»

На рис. 5 характерным является приложение нагрузки через упругий элемент k_0 при кинематическом воздействии z_0 или приложение к точке (1) силы Q_0. В рассмотренных ранее случаях в точке (1) учитывалась масса m_4, а для упругого элемента принималось, что $k_0 = k_4$. Учет упругой связи полюса (точки (1)) усложняет задачу эквивалентного преобразования в «треугольник», однако такой однозначный переход возможен. Характерным обстоятельством при этом является то, что при возмущении в полюсе в эквивалентном «треугольнике» по всем координатам появятся соответствующие внешние возмущения Q_1, Q_2 и Q_3. При этом параметры k_{12}, k_{13}, k_{23} могут быть найдены через k_1, k_2, k_3 и k_4, однако обратный переход становится неоднозначным. Некоторые возможности связаны с упрощениями в системе на основе переноса сил, как это было рассмотрено в разделе IV, что может привести к некоторым условиям связи между k_1, k_2, k_3 и k_4 в виде алгебраических уравнений.

Эквивалентность преобразований в тех случаях, когда их однозначность соблюдается, может приводить к получению более компактных структурных схем, расширяющих возможности физической интерпретации процессов динамических колебаний и образования определенных форм самоорганизации движения системы. Отметим одну из особенностей в использовании различных форм соединений. Например, трехлучевая «звезда» может быть преобразована в четырехлучевую «звезду», если полагать, что k_0 опирается не на основание, а на элемент с бесконечно большой массой.

Соединение типа «треугольник» является в классе систем, допускающих эквивалентные преобразования, самым простым. Более сложные структуры, например «*n*-угольники», могут приводиться к «треугольникам», если связи между отдельными элементами будут принимать предельные значения $(k_{i,j} = \infty)$ [6, 7]. В свою очередь, при $k_{23} \to \infty$ «треугольник» на рис. 1, *б* превращается в систему с двумя степенями свободы. В этом случае k_{12} и k_{13} должны находиться между собой в определенных соотношениях, характерных для параллельного соединения пружин. Если $k_{23} = 0$, то система превращается в одну из разновидностей систем с тремя степенями свободы. При наличии упругой связи k_{10} (рис. 1, *б*) и рассмотрении основания как звена с предельным большим значением массы можно получить соединение типа «звезда», как это было обозначено выше.

Если принимать $k_{12} = 0$ или $k_{13} = 0$, то «треугольник» превращается в цепную механическую систему с тремя степенями свободы. Использование типовых элементарных звеньев расширенного набора звеньев виброзащитных систем позволяет выйти на получение нового класса механических систем, обладающих свойствами эквивалентных преобразований и соответствующих соотношений между параметрами. Многолучевая «звезда» также может упрощаться, если принимать радиальные жесткости нулевыми. В каждом случае мы будем переходить от «звезды» с *n* лучами к звезде с *n–1* лучами и т. д., пока не придем к системе с одной степенью свободы. При выполнении условий обнуления масс также будет происходить аналогичное упрощение. Однако в этих случаях существенную роль играют дополнительные упругие элементы $k_{10}, k_{20}, ...k_{n0}$, которые могут давать и другие варианты построения структур.

При рассмотрении структур типа *n*-угольника при наличии одной связи какого-либо узла через упругий элемент $k_{i0(i=\overline{1,n})}$ с основанием,

n-угольник может быть превращен в треугольник с параметрами k_{12}, k_{23}, k_{13} обобщенных пружин [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинский И. А. Механические цепи. – М. : Машиностроение, 1977. – 237 с.
2. Синев А. В. Определение нулей передаточных функций механических колебательных систем // Управляемые механические системы. – Иркутск. Иркутский политех. ин-т, 1984. – С. 25–32.
3. Hedrichs S. L., Rairam S., Kamut N.P., Junkins I. L. Identification of Mass Dumping and Stiffness Matrices of large linear Vibrators Systems // AIAA Pap. – 1982. – № 1406. – P. 5.
4. Хоменко А. П., Елисеев С. В. Виброзащитные системы с сочленениями. Технологии построения математических моделей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – Вып. № 3(27). – С. 8–18.
5. Елисеев С. В., Резник Ю. Н., Хоменко А. П., Засядко А. А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск : Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2008. – 523 с.
6. Елисеев С. В., Ермошенко Ю. В. Динамические свойства виброзащитных систем. Предельные переходы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. Вып. № 4(28). – С. 24–31.
7. Синев А. В. Выбор параметров систем виброизоляции и динамических гасителей на основе методов синтеза цепей // Машиноведение. – 1972. – № 1. – С. 28–34.

УДК 517.988.7

Сидоров Денис Николаевич,
канд. физ.-мат. наук, доцент ИМЭИ ИГУ, с.н.с. ИСЭМ СО РАН
тел. 8-3952-42-84-40, e-mail: dsidorov@isem.sei.irk.ru
Сидоров Николай Александрович,
д.ф.-м.н. проф. ИМЭИ ИГУ
тел. 8-3952-24-22-28, e-mail: sidorov@math.isu.runnet.ru
Леонтьев Роман Юрьевич
аспирант ИМЭИ ИГУ

АСИМПТОТИЧЕСКИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ РЕШЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ С ВЕКТОРНЫМ ПАРАМЕТРОМ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ БИФУРКАЦИИ

D.N. Sidorov, N.A. Sidorov, R.Ju. Leontiev

ASYMPTOTIC APPROXIMATIONS OF SOLUTIONS TO NONLINEAR BOUNDARY PROBLEMS WITH VECTOR PARAMETER IN THE NEIGHBORHOOD OF BIFURCATION POINT

Аннотация. *Рассматривается нелинейное операторное уравнение с фредгольмовым линейным оператором в главной части. Нелинейная часть уравнения зависит от функционалов, определенных на открытом множестве линейного нормированного пространства. Предлагается метод последовательных асимптотических приближений разветвляющихся решений. Метод применен для решения нелинейной краевой задачи, описывающей колебания спутника и решения краевой задачи об изгибе стержня, лежащего на упругом основании.*

Ключевые слова: *ветвление решений, фредгольмов оператор, асимптотика, регуляризатор Треногина, последовательные приближения.*

Abstract. *Nonlinear operator equation with Fredholm linear operator in the main part is studied. Nonlinear part depends on functional defined on the open set of linear normed space. The method of successive asymptotic approximations of branching solutions is proposed. The method is applied for studies of nonlinear BVP modeling the satellite oscillations in the plane of its elliptic orbit and for solution of the BVP of the bending of rod on elastic foundation.*

Keywords: *branching solutions, Fredholm operator, asymptotic, Trenogin regularizator, successive approximations.*

Введение

Пусть X, Y – банаховы пространства, Λ – линейное нормированное пространство. Рассмотрим нелинейное операторное уравнение

$$Bu = F(u, \alpha(\lambda), \beta(\lambda)), \qquad (1)$$

где

$$F(u,\alpha,\beta) = F_N(u,\alpha,\beta) + $$
$$+O((\| u \| + |\alpha| + |\beta|)^{N+1}),$$
$$F_N(u,\alpha,\beta) = \sum_{i+k+j=1}^{N} F_{ikj}(u)\alpha^k\beta^j, F_{100} = 0,$$

$F_{ikj}(u)$ – i-степенные отображения банахова пространства X в банахово пространство Y. Замкнутый фредгольмов оператор B действует из X в Y и имеет плотную область определения в X. Предполагается, что $\{\phi_i\}_1^n$ – базис в $N(B)$, а $\{\psi_i\}_1^n$ – базис в дефектном подпространстве $N^*(B), \alpha(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$ – непрерывные функционалы параметра λ из открытого множества $\Omega \subset \Lambda$, где Λ – линейное нормированное пространство, $0 \in \partial\Omega, \alpha(0) = 0, \beta(0) = 0$. Множество Ω назовем секториальной окрестностью нуля.

Целью работы, продолжающей исследования [5, 6], является построение метода последовательных приближений непрерывных решений $u(\lambda) \to 0$ при $\Omega \ni \lambda \to 0$ в секториальной окрестности Ω точки $\lambda = 0$ и решение двух нелинейных технических краевых задач.

В работе [6] строилось решение задачи, подобной (1), максимального порядка малости. В работе [5] строились решения различных порядков малости интегрального уравнения Гаммерштейна, но с одним параметром $\lambda \in R^1$.

В основе метода этой работы лежит развитие результатов из [5, 6], полученных с помощью аналитической теории ветвления решений операторных уравнений [1–3]. Метод изложен в п. 1. В п. 2, 3 метод применен для решения двух нелинейных краевых задач. Одна из них описывает колебание спутника в плоскости его эллиптической орбиты, а другая – поведение стержня, лежащего на упругом основании, под действием сжимающей силы.

1. Теорема существования и последовательные приближения

Пусть выполнено условие:

A. Существуют $\theta = \frac{r+m}{s}$, где r, m, s – натуральные числа, такие, что отображение F_N допускает представление

$$F_N(\alpha^{\frac{r}{s}}v, \alpha, 0) = \alpha^\theta \sum_{iv+k=\theta} F_{iko}(v) + r(v,\alpha), \qquad (2)$$

причем $\| r(v,\alpha) \| = o(\alpha^\theta), \theta < N$. В конкретных случаях для определения подходящих чисел r, s, m надо нанести на координатную плоскость точки (i,k), отвечающие ненулевым членам F_{ik0} в разложении отображения $F_N(u,\alpha,0)$ и построить соответствующую диаграмму Ньютона. Искомое r/s полагается равным $tg\gamma$, где γ – угол наклона одного из отрезков диаграммы с отрицательным направлении оси абсцисс i. При этом θ будет равно ординате точки пересечения продолжения этого отрезка с осью ординат k. Так как диаграмма Ньютона может иметь несколько отрезков, то выбор натуральных чисел r, s, m может оказаться неоднозначным.

Пусть в окрестности нуля выполнено неравенство

B.
$$\| F(u,\alpha,\beta) - F(u,\alpha,0) \| \le$$
$$\le L(\| u \|, |\alpha|, |\beta|)\,|\beta|,$$

где

$$L(\| u \|, |\alpha|, |\beta|) =$$
$$= O((\| u \| + |\alpha| + |\beta|)^l), l \ge 0.$$

Пусть функционалы $\alpha(\lambda), \beta(\lambda)$ в секториальной окрестности Ω удовлетворяют оценке

C. $\beta(\lambda) = \bar{o}(\alpha^\theta(\lambda))$ при $\Omega \ni \lambda \to 0$.

Замечание. Если $l \ge \max(\frac{r+m}{s}, \frac{r+m}{r})$, то условие **C.** можно заменить на менее ограничительное $\beta = \bar{o}(\alpha^{\frac{\theta}{1+l}})$.

Пусть, кроме того, выполнено условие

D. Система алгебраических уравнений

$$L_j(c) \equiv < \sum_{ir+ks=r+m} F_{iko}(c\Phi), \Psi_j > = 0,$$

где $j = 1, \ldots, n$, $c\phi = \sum_{k=1}^{n} c_k\phi_k$, имеет простое решение c^*.

Введем регуляризатор В. А. Треногина (см. [2], с. 221)

$$\Gamma = (B + \sum_{i=1}^{n} < \cdot, \gamma_i > z_i)^{-1},$$

где $< \phi_i, \gamma_k > = \delta_{ik}, < z_i, \psi_k > = \delta_{ik}$. Для построения малых решений уравнения (1) будем использовать униформизацию

$$u = (\Gamma v(\lambda) + c(\lambda)\phi)\alpha(\lambda)^{r/s}, \qquad (3)$$

где $c(0)=c^*, v(0)=0.$ Неизвестная функция $v(\lambda)$ удовлетворяет равенствам $<v,\psi_i>=0, i=1,...,n.$

С помощью замены (3) уравнение (1) приведем к виду

$$v=F((\Gamma v+c\phi)\alpha^{r/s},\alpha,\beta)\alpha^{-r/s}, \qquad (4)$$

дополнив его равенствами

$$\alpha^{-\theta}<F((\Gamma v+c\phi)\alpha^{r/s},\alpha,\beta),\psi_j>=0, \quad j=1,...,n. \qquad (5)$$

Таким образом, задача построения ветвей (3) свелась к отысканию функций $v(\lambda)$ и $c(\lambda)=(c_1(\lambda),...,c(\lambda))'$ из системы (4) – (5). Будем искать при $\Omega \ni \lambda \to 0$ функцию $v(\lambda)\to 0$ и $c(\lambda)\to c^*$. Систему (4) – (5) рассмотрим как одно операторное уравнение

$$\Phi(\omega,\lambda)=0 \qquad (6)$$

относительно элемента $\omega=(v,c).$ Введем банахово пространство E элементов ω с нормой

$$\omega=\max_{\lambda\in\overline{\Omega_1}}(\| v(\lambda)\|_Y+|c(\lambda)|_{R^n}),$$

где $\Omega_1\subset\Omega\subset\Lambda.$ Нелинейное отображение Φ, зависящее от малого векторного параметра λ, действует из E в E. В силу выбора чисел r,s,m и вышеуказанного асимптотического согласования в области Ω функционалов $\alpha(\lambda),\beta(\lambda)$ (см. условие **C.**) оператор Φ непрерывен при $\lambda\in\Omega$ в окрестности точки $\omega_0=(0,c^*).$ При этом $\lim\limits_{\omega\to\omega_0,\Omega\ni\lambda\to 0}\Phi(\omega,\lambda)=0.$ Более того, оператор $\Phi(\omega,\lambda)$ имеет непрерывную производную Фреше по ω при $\lambda\in\Omega$ в окрестности элемента ω_0. При этом

$$\Phi_\omega(\omega_0,0)=\begin{pmatrix} I & 0\\ l & A\end{pmatrix}.$$

Здесь I – тождественный оператор из Y в Y, O – нулевой оператор из R^n в Y, $l=(l_1,...,l_n)'$, $l_j(\cdot)=<\sum\limits_{ir+ks=r+m}F'_{ik}(c^*\phi)\Gamma(\cdot),\psi_j>, j=1,...,n$ – линейные функционалы, определенные на Y,

$$A=<\sum_{ir+ks=r+m}F'_{ik}(c^*\phi)\phi_l,\psi_j>|_{l,j=\overline{1,n}}$$

– невырожденная матрица $n\times n.$ Линейный ограниченный оператор $\Phi_\omega(\omega_0,0),$ действующий из E в $E,$ имеет ограниченный обратный

$$\Phi_\omega^{-1}(\omega_0,0)=\begin{pmatrix} I & 0\\ -A^{-1}l(\cdot) & A^{-1}\end{pmatrix}.$$

Таким образом, при $\lambda\in\Omega$ уравнение (6) в окрестности точки ω_0 удовлетворяет условиям теоремы о неявном операторе ([2], с. 411). Следовательно, существует область $\Omega_1\subset\Omega, 0\in\partial\Omega$, такая, что искомое непрерывное решение $\omega\to\omega_0$ при $\Omega_1\ni\lambda\to 0$ можно найти последовательными приближениями

$$\omega_n=\omega_{n-1}-\Phi_\omega^{-1}(\omega_0,0)\Phi(\omega_{n-1},\lambda),$$

где $\omega_0=(0,c^*), n=1,2,....$ Из изложенного вытекает

Теорема 1. Пусть выполняются условия **A.–D.** Тогда существует открытая область $\Omega_1\subset\Omega$, $0\in\partial\Omega_1$, $\overline{\Omega_1}\subset\overline{\Omega}$, такая, что при $\lambda\in\overline{\Omega_1}, \beta(\lambda)=o(\alpha(\lambda))$ уравнение (1) имеет непрерывное решение

$$u(\lambda)=\alpha(\lambda)^{r/s}(c^*\phi+r(\lambda)), \qquad (7)$$

где c^* – простой корень системы **D.**, функция $r(\lambda)$ определяется однозначно последовательными приближениями, $\| r(\lambda)\|=o(1)$ при $\Omega\in\lambda\to 0.$

Следствие 1.

Если выполнены условия теоремы 1, то при $\lambda\in\Omega_1$ последовательность $u_n=\hat{u}_n+c_n\phi\alpha^{r/s}$, где функции $\hat{u}_n, c_n$ вычисляются из линейных уравнений

$$B\hat{u}_n=F(u_{n-1},\alpha,\beta),$$

$$A(c_n-c_{n-1})=-l(B(\hat{u}_n-\hat{u}_{n-1}))-$$
$$-\alpha^{-\theta}<F(u_{n-1},\alpha,\beta),\psi>,$$

$$\hat{u}_0=0, c_0=c^*, u_0=c^*\phi\alpha^{r/s}, n=1,2,...,$$

сходится к решению (7). Здесь $B=B+\sum\limits_1^n<\cdot,\gamma_i>z_i$ – обратимый оператор, A – невырожденная матрица,

$$l(B(\hat{u}_n-\hat{u}_{n-1}))=<\sum_{ir+ks=r+m}F'_{ik}(c^*\phi)(\hat{u}_n-\hat{u}_{n-1}),\psi>,$$
$$\psi=(\psi_1,...,\psi_n)'.$$

В качестве простейшей иллюстрации теоремы 1 рассмотрим интегральное уравнение

$$u(t)-3\int_0^1 tsu(s)ds=(\lambda_1^2+\lambda_2^4)u(t)- \qquad (8)$$
$$-u^3(t)+(\lambda_1^5+\lambda_2^8)t.$$

Оно удовлетворяет условиям теоремы 1. При этом $\phi = \psi = \sqrt{3}t$, $\alpha(\lambda) = \lambda_1^2 + \lambda_2^4$, $\beta(\lambda) = \lambda_1^5 + \lambda_2^8$, Ω – проколотая окрестность нуля в R^2, $r = 1, s = 2, \theta = \frac{3}{2}$.

Очевидно $\beta(\lambda) = o((\lambda_1^2 + \lambda_2^4)^{3/2})$. Поэтому замена (3) имеет вид $u = (v + ct)\alpha(\lambda)^{1/2}$, где функция $v(t)$ и параметр c, зависящий от λ_1 и λ_2 удовлетворяют системе

$$v(t) = (\lambda_1^2 + \lambda_2^4)[v + ct - (v + ct)^3] + \\ + \frac{\lambda_1^5 + \lambda_2^8}{\sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^4}} t, \qquad (9)$$

$$c - 3\int_0^1 (ct + v(t))^3 t dt + \frac{\lambda_1^5 + \lambda_2^6}{(\lambda_1^2 + \lambda_2^4)^{3/2}} = 0. \qquad (10)$$

Фиксируем начальное приближение c_0 согласно условию теоремы 1 как один из корней уравнения $c - \frac{3}{5}c^3 = 0$. На основании теоремы о неявной функции (см. [2], с. 411) система (9)–(10) имеет три решения $(v_1, c_1) \to (0, \sqrt{\frac{5}{3}})$, $(v_2, c_2) \to (0, -\sqrt{\frac{5}{3}})$, $(v_3, c_3) \to (0, 0)$ при $\lambda \to 0$. Эти решения можно найти последовательными приближениями. Следовательно, интегральное уравнение (8) имеет при $\lambda \to 0$ три малых решения

$$u_{1,2} = \pm\sqrt{\frac{5}{3}(\lambda_1^2 + \lambda_2^4)t} + o((\lambda_1^2 + \lambda_2^4)^{1/2}),$$

$$u_3 = o((\lambda_1^2 + \lambda_2^4)^{1/2}).$$

2. Построение решения краевой задачи о колебании спутника

Рассмотрим краевую задачу

$$(1 + e\cos x)\frac{d^2u}{dx^2} - 2e\sin x\frac{du}{dx} + \\ + \alpha\sin u - 4e\sin x = 0, \qquad (11)$$

$$u(0) = u(\pi) = 0, \qquad (12)$$

описывающую колебания спутника в плоскости его эллиптической орбиты [1, п. 36], [4]. Здесь e – эксцентриситет, параметр α зависит от главных центральных моментов инерции. В [1, п. 36] построено уравнение разветвления этой задачи и показано, что задача (11)–(12) может иметь три вещественных решения. Теорема 1 позволяет найти асимптотические соотношения между параметрами e и α, при выполнении которых эти решения строятся последовательными приближениями. Полагая $\alpha = \alpha_0 + \lambda$, перепишем задачу в виде операторного уравнения (1). В нашем случае линейный оператор $B = \frac{d^2}{dx^2} + \alpha_0$ действует из пространства $C^{(2)}_{[0,\pi]}$ с граничными условиями (12) в $C_{[0,\pi]}$ и является фредгольмовым, причем при $\alpha_0 = n^2, \dim N(B) = 1.$ Далее $\alpha_0 = 1$, $\phi(x) = \psi(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\sin x$. Нелинейная часть уравнения (1) имеет вид

$$F(u, \lambda, e) = -e\frac{d^2u}{dx^2} + 2e\frac{du}{dx} - \lambda\sin u + \\ + u - \sin u + 4e\sin x.$$

Если $e = 0$, то при любых α существует тривиальное решение $u_0 = 0$, причем правее критической точки (бифуркации) $\alpha_0 = n^2$ от тривиального решения ответвляются два нетривиальных решения

$$u_{1,2} = \pm 2\sqrt{2\lambda}\sin x + o(\sqrt{\lambda}).$$

Если e мало, то в малой окрестности некритических точек α существует одно малое решение.

Рассмотрим более сложный случай построения решений при малом $e > 0$ в окрестностях критической точки $\alpha_0 = 1$. Тогда кубическое уравнение

$$\xi^3 - 2\pi^2\lambda\xi + 4\pi^3 e = 0 \qquad (13)$$

является соответствующим приближенным уравнением разветвления [1, с. 508]. Если $D = 27e^2 - 2\lambda^3 < 0$, то на основании формулы Кардано это уравнение имеет три вещественных решения. Используя теорему 1, докажем существование соответствующих вещественных решений краевой задачи и возможность их построения последовательными приближениями. Здесь диаграмма Ньютона оператора $F(u, \lambda, 0)$ состоит из отрезка, проходящего через точки $(3,0), (1,1)$. Поэтому в нашем случае $r = 1, s = 2, m = 2,$ т. е. надо согласно теореме 1 использовать униформизацию (3), т. е. замену

$$u = (\Gamma v + c\sqrt{2/\pi}\sin x)\lambda^{1/2} \qquad (14)$$

с граничными условиями (12) при условии асимптотического согласования $e = o(\lambda^{3/2})$ параметров задачи. Очевидно при этом $D < 0$, т. е. приближенное уравнение разветвления имеет три вещественных решения. Оператор

$$B = \frac{d^2}{dx^2} + 1 + \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} \sin x \sin s[\cdot]ds$$

с граничными условиями (12) имеет ограниченный обратный $\Gamma \in L(C_{[0,\pi]} \to \overset{\circ}{C}{}^{(2)}_{[0,\pi]})$. Методом Лагранжа вариации произвольных постоянных, с учетом вырожденности ядра в интегральной части оператора B, найдем обратный оператор:

$$\Gamma v = \sin x \cdot (I - P)v + pv - d \sin x,$$

где $P = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} \sin x \sin s[\cdot]ds$ – проектор,

$$d = \frac{2}{\pi}(\sin x, \sin x \cdot (I - P)v).$$

Согласно условию **D.** теоремы 1 построим алгебраическое уравнение

$$L(c) \equiv -\frac{c^3}{4\pi} + c = 0$$

для определения начального приближения коэффициента c в (14). Оно имеет три простых корня $\pm 2\sqrt{\pi}, 0$. Поэтому на основании теоремы 1 краевая задача имеет при выполнении асимптотической оценки $e = o(\lambda^{3/2})$ три вещественных решения

$$u_{1,2} = \pm 2\sqrt{2\lambda} \sin x + r_{1,2}(x, \lambda, \varepsilon),$$

$$u_3 = r_3(x, \lambda, \varepsilon),$$

где функции r_i имеют оценки $r_i(\lambda) = o(\lambda^{1/2})$ при $e = o(\lambda^{3/2})$. Асимптотические приближения решений u_1, u_2, u_3 можно уточнить, решая определенные линейные уравнения согласно следствию 1.

Если $e \sim c\lambda^n$ при $\lambda \to 0$, где $n < 3/2$, то приближенное уравнение разветвления (13) имеет одно вещественное решение, т. к. тогда очевидно $D > 0$. Соответствующее единственное малое вещественное решение краевой задачи в этом случае имеет вид

$$u = -2(4e)^{1/3} \sin x + r(x, \lambda, e),$$

$$\| r(x, \lambda, e) \| = o(e^{1/3}),$$

где $r(x, \lambda, e)$ строится единственным образом последовательными приближениями, описанными в следствии 1.

Отметим, что ветвь u_3 максимального порядка малости можно искать при нулевом начальном приближении и другим способом, описанным в работе [6]. А именно, если $e = o(\lambda^2)$, то последовательные приближения u_n, где

$$\frac{d^2 u_n}{dx^2} + (1 + \lambda + \alpha)u_n = -e\frac{d^2 u_{n-1}}{dx^2} + 2e\frac{du_{n-1}}{dx} +$$
$$+ (1 + \lambda)(u_{n-1} - \sin u_{n-1}) + 4e \sin x,$$

$u_n(0) = u_n(\pi) = 0, u_0 = 0, n = 1, 2, \ldots,$

$\alpha(\delta)$ – параметр регуляризации, согласованный с погрешностью вычислений δ [7, ch. 3], сходятся к минимальной ветви u_3 решения краевой задачи (11)–(12).

3. Построение решений краевой задачи об изгибе стержня в нерегулярном случае

При изучении поведения стержней под действием сжимающей силы возникают краевые задачи вида

$$y^{(4)}(x) + 2py^{(2)}(x) + y = f(y, \beta),\ 0 \le x \le \pi; \quad (15)$$

$$y(0) = 0,\ y(\pi) = 0,$$
$$y^{(2)}(0) = 0,\ y^{(2)}(\pi) = 0, \quad (16)$$

где $f(y, \beta)$ – нелинейная функция, зависящая от малого параметра β. Технические задачи такого рода рассматривались многими авторами (см. [8], [9, стр. 323–345], [10] и др.). Например, в работе [8] изучались задачи на собственные значения таких уравнений при

$$f(y, \beta) = y^3(x) - 2py_0^{(2)}(x)\beta,$$

где y(x) описывает малый прогиб стержня, $p(\lambda)$ – величина осевого сжатия, $y_0(x)$ – начальная форма, β – амплитуда.

Для определенности далее пусть в уравнении (15)

$$f(y, \beta) = y^3(x) + a(x)\beta,$$

где $a(x)$ – заданная функция, $\beta(p)$ – параметр, зависящий от величины осевого сжатия p. Требуется построить решение задачи при достаточно малой амплитуде β.

Введем линейный оператор

$$A(p) = \frac{d^4}{dx^4} + 2p\frac{d^2}{dx^2} + 1,$$

действующий из пространства $\overset{0}{C}{}^{(4)}_{[0,\pi]}$ четырежды дифференцируемых функций, удовлетворяющих граничным условиям, в пространство $C_{[0,\pi]}$.

Точки $p_k = \frac{k^2 + \frac{1}{k^2}}{2}$ являются его изолированными фредгольмовыми особыми точками, а функции *sin(kx)* – соответствующими собствен-

ными функциями. Точки p_k будем далее называть критическими.

Если $\beta = 0$, то задача (15)–(16) при любых p^* имеет тривиальное решение $y = 0$. Вблизи этого решения при малых $|\beta|$ и малых отклонениях p от p^* может существовать одна (p^* не является критическим), или несколько равновесных форм стержня (p^* – критическое). Соответственно, если p^* не является критическим и $|\beta|$ достаточно мал, то и задача (15)–(16) имеет единственное решение.

Рассмотрим более сложный случай вычисления решения задачи (15)–(16), когда p^* – критическое.

Пусть для определенности k = 1, т. е. $p^* = 1$. Тогда $\sin x$ собственная функция оператора *A(1), dimN(A(1))=1*. Согласно обозначениям в уравнении (1) имеем

$$By = A(1)y,$$

$$F(y,\lambda,\beta) = y^3 + 2\lambda\frac{d^2y}{dx^2} + a(x)\beta,$$

где $\lambda = 1 - p, X = \overset{0}{C}{}^{(4)}_{[0,]}$, $Y = C_{[0,\pi]}$.

Таким образом, задача (15)–(16) переписана в виде $Bu = F(u,\alpha(\lambda),\beta(\lambda))$, где $\alpha = \lambda, \beta = \beta(\lambda)$. Диаграмма Ньютона такого оператора $F(y,\lambda,0)$ состоит из одного отрезка, проходящего через точки (3,0), (1,1). Поэтому r = 1, s = 2 , m = 2. Оператор B имеет вид

$$B = \frac{d^4}{dx^4} + 2\frac{d^2}{dx^2} + 1 +$$

$$+\frac{2}{\pi}\int_0^\pi \sin x \sin s[.]ds.$$

На основании обобщенной леммы Шмидта [2] оператор B имеет ограниченный обратный интегральный оператор, действующий из $C_{[0,\pi]}$ в $\overset{0}{C}{}^{(4)}_{[0,\pi]}$, отвечающий на основании [8] обобщенной функции Грина

$$G(x,s) = \begin{cases} \frac{1}{4\pi}(x^2+(s-\pi)^2 - \frac{1}{3}\pi^2 - \frac{3}{2})\sin s\sin x + \frac{x}{2\pi}\sin s\cos x - \\ -\frac{s-\pi}{2\pi}x\cos s\cos x + \frac{s-\pi}{2\pi}\cos s\sin x, 0 \le x \le s \le \pi, \\ \frac{1}{4\pi}(s^2+(x-\pi)^2 - \frac{1}{3}\pi^2 - \frac{3}{2})\sin x\sin s + \frac{x}{2\pi}\sin x\cos s - \\ -\frac{x-\pi}{2\pi}s\cos x\cos x + \frac{x-\pi}{2\pi}\cos x\sin s, 0 \le s \le x \le \pi. \end{cases}$$

Согласно условию **D,** введем алгебраическое уравнение

$$l(x) \equiv c^3\int_0^\pi \sin^4 x dx - 2c\int_0^\pi \sin^2 x dx = 0.$$

Оно имеет ровно три простых решения $c_{1,2} = \pm 2\sqrt{2/3}, c_3 = 0.$ Следовательно, при $\beta = o(\lambda^{3/2})$ и достаточно малых $|\lambda|$ задача (15)-(16) имеет ровно три решения:

$$y_{1,2} = \pm 2\sqrt{\frac{2\lambda}{3}}\sin x + r_{1,2}(\lambda)$$

$$y_3 = r_3(\lambda)$$

где $r_i(\lambda) = o(|\lambda|^{1/2}), i = 1,2,3.$

Очевидно, что при $\lambda > 0$ решения y_1, y_2 будут вещественными. Решение y_3 имеет максимальный порядок малости при $\lambda \to 0.$

Как и в случае краевой задачи (11)-(12) для построения решения $y_3(\lambda)$ и уточнения асимптотики первых двух решений можно применить схему последовательных приближений, описанную в следствии 1. Для построения решения $y_3(\lambda)$, имеющего максимальный порядок малости, как и в задаче (11)-(12) можно использовать и другой способ последовательных приближений, описанный в работе [6].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-08-00109 и № 09-01-00377) в рамках ФЦП «Научные и педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.», гос. контракт No.696 20.09.2010.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнберг М. М., Треногин В. А. Теория ветвления решений нелинейных уравнений. – М. : Наука, 1969.
2. Треногин В. А. Функциональный анализ. – М. : Наука, 2007. – 488 с.
3. Сидоров Н. А., Треногин В. А. Точки бифуркации решений нелинейных уравнений // Нелинейный анализ и нелинейные дифференциальные уравнения / ред. Треногин В. А., Филиппов А. Ф. – М. : Физматлит, 2003. – С. 5–50.
4. Торжевский А. П. Периодические решения плоских колебаний спутника на эллиптической орбите // Космические исследования. – 1965. – Т. 2, вып. 5.
5. Сидоров Н. А., Сидоров Д. Н. О решении интегрального уравнения Гаммерштейна в нерегулярном случае методом последовательных приближений // Сибирский математический журнал. – 2010. – Т. 51, N. 2. – С. 404–414.
6. Сидоров Н. А., Леонтьев Р. Ю. О решении максимального порядка малости нелинейных уравнений с векторным параметром в секториальных окрестностях // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. – 2010. – Т. 16, N. 2. –

С. 226–237.
7. Sidorov N., Loginov B., Sinitsin A., Falaleev M. Lyapunov-Schmidt Methods in Nonlinear Analysis and Applications. – Kluwer Ac. Publ., 2002. – 548 p.
8. Keener J. P. Buckling Imperfection Sensitivity of Columns and Spherical Caps // University of Arizona. – 1974. – P. 173–188.
9. Крейн С. Г. Функциональный анализ. – М. : Наука, 1972. – 544 с.
10. Коллатц Л. Задачи на собственные значения. – М. : Наука, 1968. – 503 с.
11. Сидоров Н. А. Общие вопросы регуляризации в задачах теории ветвления. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 1982. – 311 с.

УДК 621.914.6: 004.942

Андросов Сергей Павлович,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов»
Омского государственного технического университета,
тел.: (3812)-652026, 89081155106, e-mail: asp57@list.ru
Браилов Иван Григорьевич,
д-р техн. наук, профессор кафедры «Прикладная механика»
Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, тел.: (3812)-651176

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РЕЖУЩИХ КРОМОК ЧЕРВЯЧНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ С ЗАКРУГЛЕННОЙ ВЕРШИНОЙ ЗУБЬЕВ

S.P. Androsov, I.G. Brailov

ANALYTICAL DESCRIPTION OF HOB MODULAR CUTTER WITH ROUNDED CUTTING EDGES

Аннотация. *В работе рассматривается аналитическая модель червячной модульной фрезы для обработки цилиндрических зубчатых колес на основе ее описания параметрическими векторными функциями. Модель предназначена для исследования процесса формообразования при зубофрезеровании.*

Ключевые слова: *червячная модульная фреза, моделирование, векторная функция, зубофрезерование.*

Abstract. *This rapper deals with the analytical pattern of a hob modular cutter for the cylindrical gears processing on basis of its description by parametric vector functions. The model is intended for the investigation of a form-building process in the gear milling.*

Keywords: *hob modular cutter, modelling, vector function, gear milling.*

В производстве зубчатых колес фрезерование червячными фрезами является самым распространенным способом. Несмотря на широкое применение и достаточно большую теоретическую и экспериментальную проработку, данный способ остается с нерешенными и противоречивыми задачами [1, 2].

Зубофрезерование с точки зрения анализа взаимодействия заготовки с червячной фрезой, их кинематики и силовых воздействий является сложным пространственным и многопараметрическим процессом.

Настоящая работа посвящена разработке аналитической модели червячной модульной фрезы на основе ее описания параметрическими векторными функциями. Моделирование инструментов со сложным профилем, к которым относится червячная фреза, дает возможность исследования операций резания и формообразования зубьев. Например, решение следующих задач: нахождение координат точек режущих кромок зубьев фрезы, осуществляющих снятие металла; определение сил, возникающих при зубообработке на каждом из зубьев фрезы при различных их положениях в пространстве. Кроме того, необходимость определения сил при зубофрезеровании, как отмечается в работе [3], обусловлена не только точностными показателями зубчатого колеса, но и возможностью расчета оптимальных режимов резания.

В статье рассматривается модель червячной модульной фрезы с закругленной вершиной зубьев. Модель является проволочной, так как она предусматривает описание векторными функциями только режущих кромок зубьев фрезы. В модели не рассматриваются участки закругления ножки зуба, а также кромки впадин, поскольку они не принимают участия в резании и формообразовании зубьев. Модель учитывает винтовой характер режущих кромок зубьев фрезы.

Профиль зуба фрезы в нормальном сечении (рис. 1) имеет пять участков. Участки O_1A и O_5D образуют боковые режущие кромки, наклоненные под углом профиля α_0. Эти участки в своих локальных системах координат $O_1Y_1Z_1$ и $O_5Y_5Z_5$ описываются векторами:

$$\bar{r}_л(1)=\begin{bmatrix}0\\ y_1\\ z_1\end{bmatrix};\qquad \bar{r}_л(5)=\begin{bmatrix}0\\ y_5\\ -z_5\end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Периферийная режущая кромка O_3C в своей локальной системе координат $O_3Y_3Z_3$ описывается вектором

$$\bar{r}_л(3)=\begin{bmatrix}0\\ y_3\\ 0\end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Участки закругления вершины зуба AO_3 и CO_5 описываются векторными функциями дуги окружности:

$$\bar{r}_л(2)=\begin{bmatrix}0\\ -\rho_{a0}\sin\gamma_2\\ \rho_{a0}\cos\gamma_2\end{bmatrix};\quad \bar{r}_л(4)=\begin{bmatrix}0\\ \rho_{a0}\sin\gamma_4\\ \rho_{a0}\cos\gamma_4\end{bmatrix}. \quad (3)$$

Модули векторов $\bar{r}_л(2)$ и $\bar{r}_л(4)$ равны радиусу ρ_{a0} (рис. 1).

В локальной системе координат OYZ для первого зуба первой рейки векторы (1), (2), (3) запишутся:

$$\bar{r}_{л0}(1)=[M]\,\bar{r}_{0л}(1)+\bar{r}_л(1)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\0\\R_{f0}\end{bmatrix}+$$

$$+\begin{bmatrix}0\\ y_1\\ z_1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ y_1\\ R_{f0}+z_1\end{bmatrix};$$

$$\bar{r}_{л0}(2)=[M]\,\bar{r}_{0л}(2)+\bar{r}_л(2)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2\\ R_{a0}-\rho_{a0}\end{bmatrix}+$$

$$+\begin{bmatrix}0\\ -\rho_{a0}\sin\gamma_2\\ \rho_{a0}\cos\gamma_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2-\rho_{a0}\sin\gamma_2\\ R_{a0}-\rho_{a0}(1-\cos\gamma_2)\end{bmatrix};$$

$$\bar{r}_{л0}(3)=[M]\,\bar{r}_{0л}(3)+\bar{r}_л(3)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2\\ R_{a0}\end{bmatrix}+$$

$$+\begin{bmatrix}0\\ y_3\\ 0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2+y_3\\ R_{a0}\end{bmatrix};$$

$$\bar{r}_{л0}(4)=[M]\,\bar{r}_{0л}(4)+\bar{r}_л(4)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2+y_3\\ R_{a0}-\rho_{a0}\end{bmatrix}+$$

$$+\begin{bmatrix}0\\ \rho_{a0}\sin\gamma_2\\ \rho_{a0}\cos\gamma_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ y_1+y_2+y_3+\rho_{a0}\sin\gamma_2\\ R_{a0}-\rho_{a0}(1-\cos\gamma_2)\end{bmatrix};$$

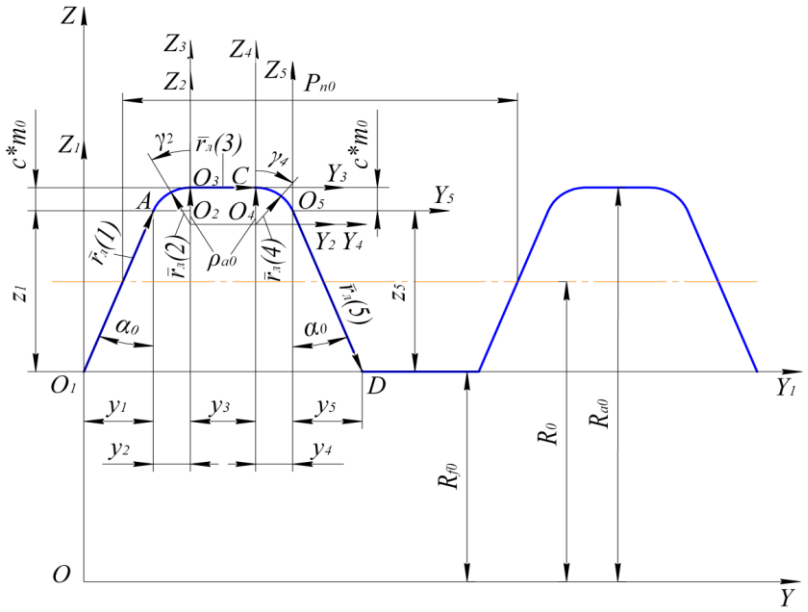


Рис. 1. Профиль зубьев фрезы: ρ_{a0} – радиус закругления на головке зуба; α_0 – угол профиля; m_0 – модуль зубьев; c^* – коэффициент радиального зазора; R_{f0} – радиус внутреннего цилиндра; R_0 – радиус делительного цилиндра; R_{a0} – радиус наружного цилиндра; P_{n0} – нормальный шаг зубьев; γ_2 и γ_4 – параметрические углы дуги окружности

$$\bar{r}_{л0}(5)=\left[M\right]\bar{r}_{0л}(5)+\bar{r}_{л}(5)=$$
$$=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0\\y_1+y_2+y_3+y_4\\R_{f0}+z_5\end{bmatrix}+$$
$$+\begin{bmatrix}0\\y_5\\-z_5\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\y_1+y_2+y_3+y_4+y_5\\R_{f0}\end{bmatrix},\qquad(4)$$

где $\left[M\right]$ – матрица параллельного переноса системы координат; $\bar{r}_{0л}(1)$, $\bar{r}_{0л}(2)$, $\bar{r}_{0л}(3)$, $\bar{r}_{0л}(4)$ и $\bar{r}_{0л}(5)$ – векторы переноса локальных систем координат $O_1Y_1Z_1$, $O_2Y_2Z_2$, $O_3Y_3Z_3$, $O_4Y_4Z_4$ и $O_5Y_5Z_5$ соответственно.

В формулах (4) параметрические углы γ_2 и γ_4 имеют значения:

$$0°\le\gamma_2\le 90°-\alpha_0;\ 0°\le\gamma_4\le 90°-\alpha_0.$$

Радиус закругления на головке зуба фрезы определяется по формуле [3]

$$\rho_{a0}=\frac{c^{*}m_0}{1-\sin\alpha_0}.\qquad(5)$$

Моделирование по зубьям фрезы с учетом винтового движения описывается вектором $\bar{r}(i,j,k,n)$ (рис. 2, *а*). Начало вектора $\bar{r}(i,j,k,n)$ размещается в торцевом сечении фрезы в центре O_0 основной (глобальной) системы координат $X_0O_0Y_0Z_0$. Ось O_0Y_0 совмещена с осью фрезы.

Вектор $\bar{r}(i,j,k,m)$ имеет следующие обозначения: i – номер вектора на зубе, j – номер зуба на рейке фрезы; k – номер рейки на фрезе; n – количество точек на векторе. Количество точек n на векторе может принимать значение от 1 до любого целого числа p в зависимости от необходимой точности.

Вектор $\bar{r}(i,j,1,n)$ в общем виде для зубьев первой рейки записывается

$$\bar{r}(i,j,1,n)=\begin{bmatrix}R(i,j,k,n)\sin\phi_1(i,j,k,n)\\a\,\phi_1(i,j,k,n)\\R(i,j,k,n)\cos\phi(i,j,k,n)_1\end{bmatrix},\qquad(6)$$

где $R(i,j,k,n)$ – текущий радиус, который может принимать значения в пределах от величины радиуса внутреннего цилиндра R_{f0} фрезы до радиуса ее наружного цилиндра R_{a0}; $\phi_1(i,j,k,n)$ – текущий параметрический угол (рис. 2, *б*), который изменяется в пределах от нулевого значения до $\phi_{1\max}$; a – параметр, характеризующий движение по винтовой линии вдоль оси фрезы O_0Y_0.

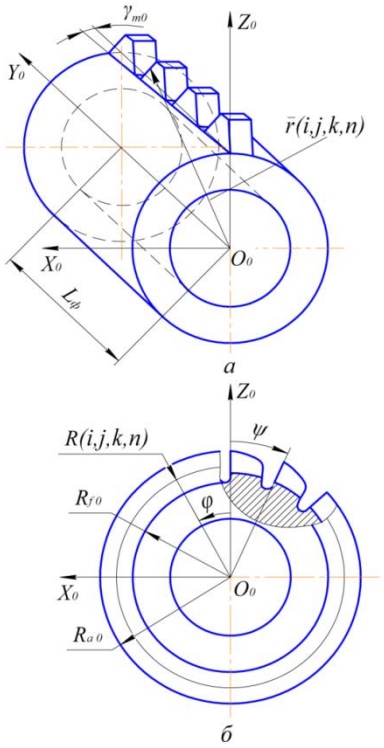


Рис. 2. Образование винтового движения

Значение параметра a определяется выражением

$$a=\frac{P_k}{2\pi},\qquad(7)$$

где P_k – шаг винтовой стружечной канавки.

По делительному цилиндру радиуса R_0 шаг P_k вычисляется по формуле

$$P_k=\frac{2\pi R_0}{tg\gamma_{m0}},\qquad(8)$$

где γ_{m0} – угол подъема винтовой стружечной канавки фрезы.

Максимальное значение угла $\phi_{1\max}$ определяется зависимостью

$$\phi_{1\max}=\frac{L_\phi\,2\pi}{P_k},\qquad(9)$$

где L_ϕ – длина активного участка режущих зубьев фрезы.

С учетом выражения (9) параметр a определяется отношением

$$a=\frac{L_\phi}{\phi_{1\max}}=\frac{V}{\omega},\qquad(10)$$

где V – скорость перемещения конца вектора $\bar{r}(i,j,1,n)$ вдоль оси O_0Y_0; ω – угловая скорость вращения этого же вектора вокруг оси O_0Z_0.

Для любой точки режущих кромок фрезы текущее значение параметрического угла $\phi(i, j, k, n)$ определяется выражением

$$\phi_1(i, j, k, n) = \frac{y(i, j, k, n)}{a_1 \cos\gamma_{m0}}, \qquad (11)$$

где $y(i, j, k, n)$ – координата по оси OY точки на зубе в нормальном сечении фрезы в системе координат OYZ.

Координаты точек режущих кромок первого зуба в нормальном сечении фрезы, описывающих векторами с номерами $i = 1, i = 3, i = 5$, определяются выражениями:

$$\begin{aligned} y(i, j, k, n) &= y(i-1, j, k, p) + l(i, n)\bar{e}_y\left(\bar{r}_л(i)\right); \\ z(i, j, k, n) &= z(i-1, j, k, p) + l(i, n)\bar{e}_z\left(\bar{r}_л(i)\right). \end{aligned} \qquad (12)$$

где $\bar{e}_y\left(\bar{r}_л(i)\right)$ и $\bar{e}_z\left(\bar{r}_л(i)\right)$ – единичные векторы векторных функций $\bar{r}_л(i)$; $l(i, n)$ – выбранное значение части длины векторов $\bar{r}_л(i)$, $0 \le l \le \left|\bar{r}_л(i)\right|$.

Для векторов первого зуба с номерами $i = 2, i = 4$ координаты вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} y(i, j, k, n) &= y(i-1, j, k, p) \mp \bar{r}_y(i, n); \\ z(i, j, k, n) &= z(i-1, j, k, p) \pm \bar{r}_z(i, n), \end{aligned} \qquad (13)$$

где $\bar{r}_y(i, n)$, $\bar{r}_z(i, n)$ – проекции го векторов с номерами $i = 2, i = 4$ на координатные оси OY и OZ.

Координата $y(i, j, k, n)$ любой точки режущих кромок второго и последующих зубьев фрезы определяется выражением

$$y(i, j, k, n) = y(i, j-1, k, p) + P_{n0}. \qquad (14)$$

Значения текущего радиуса $R(i, j, k, n)$ вычисляются по формуле

$$R(i, j, k, n) = R_{f0} + z(i, j, k, n). \qquad (15)$$

Зубья других реек описываются следующим образом. Номер рейки k изменяется от 1 до числа реек, равного числу зубьев фрезы z_0. Зубья каждой из реек поворачиваются на угол $\xi(k) = (k-1)\cdot\psi$, где $\psi = 2\pi / z_0$ (рис. 2, б). В результате точка O_1 (рис. 1) начала координат каждой рейки смещается по осям O_0X_0 и O_0Z_0 на следующие величины:

$$x = -R_{f0}\sin\psi; \qquad z = R_{f0}\cos\psi. \qquad (16)$$

По оси O_0Y_0 смещение точки O_1 каждой из реек определяется по формуле

$$\delta(k) = \frac{P_n(k-1)}{z_0 \cos\gamma_{m0}}. \qquad (17)$$

С учетом (17) вектор (6) запишется

$$\bar{r}(i, j, k, n) = \begin{bmatrix} R(i, j, k, n)\sin\phi_1(i, j, k, n) \\ a\,\phi_1(i, j, k, n) + \delta(k) \\ R(i, j, k, n)\cos\phi_1(i, j, k, n) \end{bmatrix}. \qquad (18)$$

Принимая во внимание поворот на угол $\xi(k)$, вектор $\bar{r}^*(i, j, k, n)$ для каждой из реек имеет значение

$$\bar{r}^*(i, j, k, n) = [M_1]\bar{r}(i, j, k, .n) = \begin{bmatrix} \cos\xi(k) & 0 & -\sin\xi(k) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\xi(k) & 0 & \cos\xi(k) \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} R(i, j, k, n)\sin\phi_1(i, j, k, n) \\ a\phi(i, j, k, n)_1 + \delta(k) \\ R(i, j, k, n)\cos\phi_1(i, j, k, n) \end{bmatrix}, \qquad (19)$$

где $[M_1]$ – матрица поворота против часовой стрелки вокруг оси O_0Y_0.

После перемножения матрицы $[M_1]$ и вектора $\bar{r}(i, j, k, n)$ векторная функция, описывающая режущие кромки зубьев всех реек червячной фрезы, окончательно определяется выражением

$$\bar{r}^*(i, j, k, n) = \begin{bmatrix} R(i, j, k, n)\sin\left(\phi_1(i, j, k, n) - \xi(k)\right) \\ a\phi_1(i, j, k, n) + \delta(k) \\ R(i, j, k, n)\cos\left(\phi_1(i, j, k, n) - \xi(k)\right) \end{bmatrix}. \qquad (20)$$

В результате разработана аналитическая модель червячной модульной фрезы, описывающая положение режущих кромок всех её зубьев в пространственном отображении, что дает возможность исследовать процесс резания и формообразования при зубообработке цилиндрических зубчатых колес.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фингер М. Л. Цилиндрические зубчатые колеса. Теория и практика изготовления. – М. : Научная книга, 2005. – 368 с.
2. Клепиков В. В. Совершенствование процессов обработки зубчатых колес за счет конструкторских и технологических параметров : автореф. дис. … докт. техн. наук : 05.03.01. – М. : МГИУ, 2001. – 41 с.
3. Полохин О. В., Тарапанов А. С., Харламов Г. А. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа. – М. : Машиностроение, 2006. – 148 с.

УДК 62.531

Ешенко Анатолий Андреевич,
канд. техн. наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта
Иркутского государственного технического университета,
р.т. (3952) 405-128, д.т. (3952) 42-71-96, e-mail: eshenkoaa@yandex.ru

СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ И ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ И ВОЗДУХА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

A.A. Eshenko

STRUCTURAL MODELS OF MOVEMENT AND PRESSURE OF GASES AND AIR IN GLASS FURNACE'S WORKING SPACE

Аннотация. *Рассмотрен подход к разработке и представлению структурных моделей, которые могут служить основой аналитического конструирования регуляторов многосвязных технологических процессов стекловарения.*

Ключевые слова: *структурные модели, стекловаренная печь.*

Abstract. *The approach to working out and representating structural models which can form a basis for multicoherent glassmaking technological processes regulators analytical designing is considered.*

Keywords: *structural models, glass the furnace.*

Поддержание параметров теплового режима стекловаренных печей в соответствии с протекающими процессами при работе с высокой интенсивностью является необходимым условием достижения высокой производительности и качества продукции.

Автоматическому регулированию режима ванной печи подлежат: распределение давления в рабочем пространстве P_i, расход топлива и подвод воздуха ΔD, давление горючего газа $P_Г$, температурный режим в регенераторах и варочной части.

Воздух и горючий газ поступают в печь под действием нагнетательных устройств и геометрического напора, создающегося в регенераторах и горелках (рис. 1, *а*). Горючий газ подается в печь под давлением в газопроводе, создаваемом воздуходувным устройством газостанции. На пути дымовых газов через горелочные каналы и регенераторы приходится преодолевать помимо местных сопротивлений и сопротивлений трения по длине также противодействующий напор, создаваемый дымовыми газами. Газы поступают в пламенное пространство струей, состоящей из топлива, воздуха и продуктов сгорания.

Образующийся факел взаимодействует с продуктами сгорания. Поле давлений в печной плоскости $P_3 - P_4$ появляется в результате взаимодействия полей давлений, создаваемых подающими и отводящими газы устройствами и геометрическим напором.

Попеременная подача газа и воздуха в печь и отведение газов из печи осуществляется с помощью переводных клапанов. При соединении посредством этих клапанов регенератора с дымовой трубой отходящие газы отводятся из печи через регенератор и трубу, а при соединении с газопроводом горючего газа или атмосферой в печь поступает газ или воздух.

Переводные клапаны в схеме замещения обозначаются K_i с соответствующим индексом $i = 1, 2, 3$ в положении для одного из двух возможных направлений движения воздуха и газов. В режиме реверса контакты *K* изменяют свое положение на противоположное.

Последовательность перестановки клапанов принята: одновременно выключается подача газа и воздуха K_1, затем переключаются переводные клапаны K_2, после чего одновременно включается подача газа и воздуха и отвод отходящих газов K_3.

Широкое использование автоматического регулирования является обязательным элементом эксплуатации печей. Для правильного регулирования режима работы печи необходимо контролировать расходы воздуха и газообразного топлива. Контроль включает определение выхода и количество продуктов газификации и горения, расхода воздуха, поддержание материального и теплового балансов.

В этой связи весьма актуальной представляется разработка и использование математических моделей как базы для синтеза систем автоматиче-

ского управления тепловой работой ванных стекловаренных печей, анализа и прогнозирования их режимов методами математического моделирования.

Ранее в работах [1–3] предложены модели элементов регулируемых участков теплоэнерготехнологических объектов для систем, обтекаемых сжимаемой или несжимаемой средой. При выводе уравнений, описывающих динамические свойства элементов, исходили из соответствующих предположений. Для систем в случае протекания газа или пара принималась во внимание сжимаемость рабочего тела в связи с ее влиянием на аккумулируемую системой среду. В случае систем с жидкостным заполнением учитывали инерцию перемещающейся массы, но пренебрегали сжимаемостью среды. Вывод уравнений динамики отдельных элементов системы основывался на балансе масс, давлений и на уравнениях термодинамического состояния.

При рассмотрении процессов движения и распределения давлений газов и воздуха в стекловаренной печи предполагаем, что изменения давления, обусловленные трением в трубопроводах, дросселированием в регулирующих клапанах, сжатием или расширением в турбомашинах, существенны. Кроме этого учитываем, что колебания давления связаны с заметными колебаниями плотности, что приводит к изменению объема всей рабочей среды или части ее.

Эффект такой аккумуляции сказывается в больших объемах не только печи, но и регенераторов и трубопроводов.

Используя разработанную методику аналитического получения моделей элементов [1, 2, 3], построим структурные модели автоматизируемых участков ванных стекловаренных печей, удобные для целей синтеза автоматических управляющих устройств.

Модели технологических контуров, по которым протекает газ, топливо, воздух, строятся на основе эквивалентных схем замещения, разработанных для типовых элементов объектов регулирования расхода и давления.

Запишем уравнения для отдельных элементов на каждом конкретном участке движения газов, воздуха и газо-воздушной смеси для схемы замещения (рис. 1, *б*) для обоих возможных вариантов направления движения газов и воздуха.

Для воздухопроводной магистрали, состоящей из вентилятора, воздуховода и регенератора, согласно схеме замещения на участке $P_{вх} - P_2$ уравнения, записанные для приращений в относительных единицах:

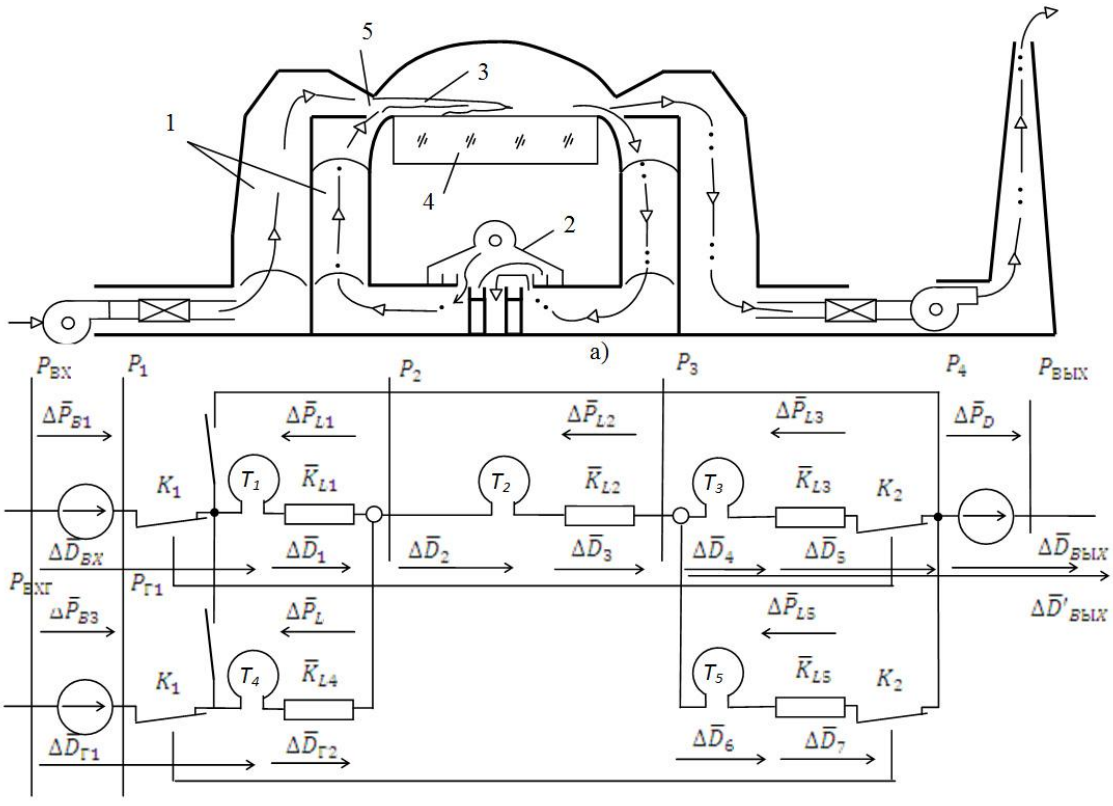


Рис. 1. Движение топлива и воздуха в печи: а) разрез печи; б) схема замещения; 1 – воздушные и газовые регенераторы; 2 – газовый переводной клапан; 3 – факел, пламенное пространство; 4 – бассейн; 5 – горелки

$$\left.\begin{aligned}\Delta\bar{P}_1-\Delta\bar{P}_{BX}&=-\bar{K}_{BD1}\Delta\bar{D}_{BX}+\bar{K}_{B\omega1}\Delta\bar{\omega}_1;\\ \Delta\bar{D}_{BX}-\Delta\bar{D}_1&=T_1\frac{d\Delta\bar{P}_1}{dt};\\ \Delta\bar{P}_1-\Delta\bar{P}_2&=\bar{K}_{L1}\Delta\bar{D}_1.\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

На участке, включающем в себя пламенное пространство печи и тракт эвакуации газа $\bar{P}_2-\bar{P}_{вых}$, уравнения баланса:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\bar{D}_2&=\Delta\bar{D}_1+\Delta\bar{D}_{Г2};\\ \Delta\bar{D}_2-\Delta\bar{D}_3&=T_2\frac{d\Delta\bar{P}_2}{at};\\ \Delta\bar{P}_2-\Delta\bar{P}_3&=\bar{K}_{L2}\Delta\bar{D}_3;\\ \Delta\bar{D}_4-\Delta\bar{D}_5&=T_3\frac{d\Delta\bar{P}_3}{at};\\ \Delta\bar{P}_3-\Delta\bar{P}_4&=\bar{K}_{L3}\Delta\bar{D}_5;\\ \Delta\bar{D}_{ВЫХ}&=\Delta\bar{D}_5+\Delta\bar{D}_7;\\ \Delta\bar{P}_{ВЫХ}-\Delta\bar{P}_4&=-\bar{K}_{BD2}\Delta\bar{D}_{ВЫХ}-\bar{K}_{B\omega2}\Delta\bar{\omega}_2.\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

Уравнения для циркуляционного кольца через клапан на регенераторы:

$$\left.\begin{aligned}\Delta\bar{P}_{Г1}-\Delta\bar{P}_{ГВХ}&=-\bar{K}_{BD3}\Delta\bar{D}_{Г1}+\bar{K}_{B\omega3}\Delta\bar{\omega}_1;\\ \Delta\bar{D}_{Г1}-\Delta\bar{D}_{Г2}&=T_4\frac{d\Delta\bar{P}_{Г1}}{at};\\ \Delta\bar{P}_{Г1}-\Delta\bar{P}_2&=\bar{K}_{L4}\Delta\bar{D}_{Г2};\\ \Delta\bar{D}_6&=\Delta\bar{D}_3-\Delta\bar{D}_4;\\ \Delta\bar{D}_6-\Delta\bar{D}_7&=T_5\frac{d\Delta\bar{P}_3}{at};\\ \Delta\bar{P}_3-\Delta\bar{P}_4&=\bar{K}_{L5}\Delta\bar{D}_7.\end{aligned}\right\}\quad(3)$$

В уравнениях (1)–(3) приняты обозначения: $\Delta\bar{P},\Delta\bar{D},\Delta\bar{\omega}$ в относительных единицах и отклонениях соответственно давление, расход, угловая частота вращения.

$\bar{K}_{BD},\bar{K}_{B\omega},\bar{K}_L,T$ – соответственно характеристические коэффициенты турбомашин, воздуховодов и постоянные времени. Индексы коэффициентов соответствуют элементам, приведенным на схеме замещения.

Структурная модель движения и давления газов и воздуха для одного направления, обозначенного стрелками на рис. 1, построенная по уравнениям (1) – (3), представлена на рис. 2.

Запишем уравнения (1)–(3) в нормальной форме (4):

$$\left.\begin{aligned}P\Delta\bar{P}_1&=\frac{1}{T_1}\left(\frac{1}{\bar{K}_{BD1}}\Delta\bar{P}_{BX}-\frac{\bar{K}_{BD1}+\bar{K}_{L1}}{\bar{K}_{BD1}\bar{K}_{L1}}\Delta\bar{P}_1+\right.\\ &\left.+\frac{1}{\bar{K}_{L1}}\Delta\bar{P}_2+\frac{\bar{K}_{B\omega1}}{\bar{K}_{BD1}}\Delta\bar{\omega}_1\right);\\ P\Delta\bar{P}_2&=\frac{1}{T_2}\left(\frac{1}{\bar{K}_{L2}}\Delta\bar{P}_1-\frac{\bar{K}_{L2}+\bar{K}_{L4}}{\bar{K}_2\bar{K}_{L4}}\Delta\bar{P}_2+\frac{1}{\bar{K}_{L4}}\Delta\bar{P}_{Г1}\right);\\ P\Delta\bar{P}_3&=\frac{1}{T_3}\left(\frac{1}{\bar{K}_{L2}}\Delta\bar{P}_2-\frac{\bar{K}_{L2}+\bar{K}_{L3}}{\bar{K}_{L2}\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{P}_3+\frac{1}{\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{P}_{ВЫХ}-\right.\\ &\left.-\frac{\bar{K}_{BD2}}{\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{D}_{ВЫХ}+\frac{\bar{K}_{B\omega2}}{\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{\omega}_2\right);\\ P\Delta\bar{P}_Г&=\frac{1}{T_4}\left(\frac{1}{\bar{K}_{BD3}}\Delta\bar{P}_{ГВХ}-\frac{\bar{K}_{BD3}+\bar{K}_{L4}}{\bar{K}_{BD3}\bar{K}_{L4}}\Delta\bar{P}_{Г1}-\right.\\ &\left.-\frac{1}{\bar{K}_{L4}}\Delta\bar{P}_2+\frac{\bar{K}_{B\omega3}}{\bar{K}_{BD3}}\Delta\bar{\omega}_3\right).\end{aligned}\right\}$$

Решение задач синтеза автоматических управляющих устройств связано с исследованием состояний автоматической системы, множество которых образует пространство состояний. Для представления уравнений (4) в форме пространст-

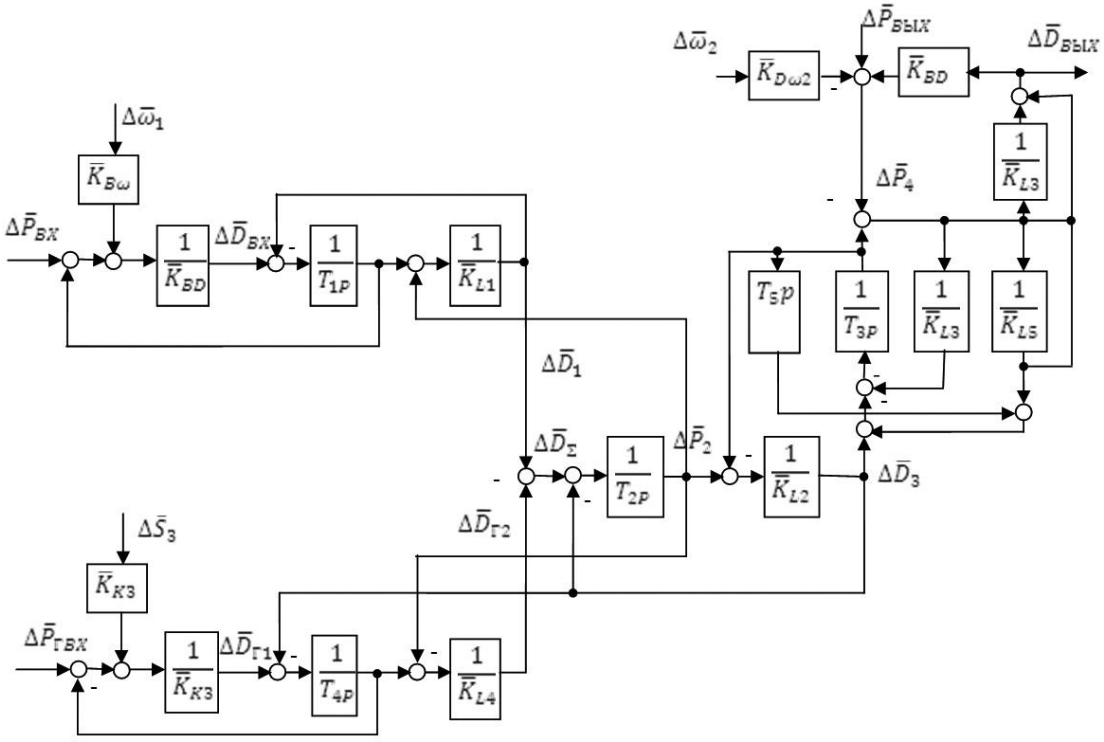


Рис. 2. Структурная модель движения газов и воздуха в стекловаренной печи

ва состояний вводим обозначения $\Delta\bar{P}_1 = X_1, \Delta\bar{P}_2 = X_2, \Delta\bar{P}_3 = X_3, \Delta\bar{P}_\Gamma = X_4,\ P\Delta\bar{P}_1 = \dot{X}_1, P\Delta\bar{P}_2 = \dot{X}_2,\ P\Delta\bar{P}_3 = \dot{X}_3,\ P\Delta\bar{P}_\Gamma = \dot{X}_4,$

и записываем в виде:

$$\left.\begin{aligned}
\dot{X}_1 &= \frac{1}{T_1}\left(\frac{1}{\bar{K}_{BD1}}\Delta\bar{P}_{BX} - \frac{\bar{K}_{BD1}+\bar{K}_{L1}}{\bar{K}_{BD1}\bar{K}_{L1}}X_1 - \frac{1}{\bar{K}_{L1}}X_2 + \right.\\
&\qquad \left. + \frac{\bar{K}_{B\omega 1}}{K_{BD1}}\Delta\bar{\omega}_1\right);\\
\dot{X}_2 &= \frac{1}{T_2}\left(\frac{1}{K_{L2}}X_1 - \frac{\bar{K}_{L1}+\bar{K}_{L4}}{\bar{K}_{L2}\bar{K}_{L4}+}X_4 + \frac{1}{K_{L4}}X_4\right);\\
\dot{X}_3 &= \frac{1}{T_3}\left(\frac{1}{\bar{K}_{L2}}X_2 - \frac{\bar{K}_{L2}+\bar{K}_{L3}}{\bar{K}_{L2}\bar{K}_{L3}+}X_3 - \frac{1}{\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{P}_{BbIX} - \right.\\
&\qquad \left. \frac{\bar{K}_{BD2}}{\bar{K}_{L3}}\Delta\bar{D}_{BbIX} + \frac{\bar{K}_{B\omega 2}}{K_{L3}}\Delta\bar{\omega}_2\right);\\
\dot{X}_4 &= \frac{1}{T_4}\left(\frac{1}{\bar{K}_{BD3}}\Delta\bar{P}_{\Gamma BX} - \frac{\bar{K}_{BD3}+\bar{K}_{L4}}{\bar{K}_{BD3}\bar{K}_{L4}}X_4 - \frac{1}{\bar{K}_{L4}}X_2 + \right.\\
&\qquad \left. + \frac{\bar{K}_{B\omega 3}}{K_{BD3}}\Delta\bar{\omega}_3\right).
\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Полученная эквивалентная система линейных дифференциальных уравнений, разрешенная относительно производных от переменных, в матричной записи имеет вид

$$\begin{bmatrix}\dot{X}_1\\ \dot{X}_2\\ \dot{X}_3\\ \dot{X}_4\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0\\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24}\\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0\\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_1\\ X_2\\ X_3\\ X_4\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & b_{32} & 0\\ 0 & 0 & b_{43}\end{bmatrix}\begin{matrix}\Delta\bar{\omega}_1\\ \\ \Delta\bar{\omega}_2\\ \Delta\bar{\omega}_3\end{matrix},$$

где

$$a_{11} = -\frac{\bar{K}_{BD1}+\bar{K}_{L1}}{T_1\bar{K}_{BD1}\bar{K}_{L1}};\quad a_{12} = \frac{1}{T_1\bar{K}_{L1}};\quad b_{11} = -\frac{\bar{K}_{B\omega 1}}{T_1\bar{K}_{BD}};$$

$$a_{21} = \frac{1}{T_2\bar{K}_{L2}};\quad a_{22} = -\frac{\bar{K}_{L2}+\bar{K}_{L4}}{T_2\bar{K}_{L2}\bar{K}_{L4}};\quad a_{24} = \frac{1}{T_2\bar{K}_{L4}};$$

$$a_{32} = \frac{1}{T_3\bar{K}_{L2}};\quad a_{33} = -\frac{\bar{K}_{L2}+\bar{K}_{L3}}{T_3\bar{K}_{L2}\bar{K}_{L3}};\quad b_{32} = -\frac{\bar{K}_{B\omega 2}}{T_3\bar{K}_{L3}};$$

$$a_{42} = -\frac{1}{T_4\bar{K}_{L4}};\quad a_{44} = -\frac{\bar{K}_{BD3}+\bar{K}_{L4}}{T_4\bar{K}_{BD3}\bar{K}_{L4}};\quad b_{43} = -\frac{\bar{K}_{B\omega 3}}{T_4\bar{K}_{BD3}}.$$

Динамические свойства системы определяются собственными числами матрицы коэффициентов системы $A = \Sigma a_{ij}$ $(i = j = 1, 2, ..., 4)$ и матрицы управления $B = \Sigma b_{ij}$ $(i = 1, 2, ..., 4;\ j = 1, 2, 3)$.

Полученные системы замкнутых уравнений баланса печи и регенераторов можно использовать для оценки наиболее общих свойств системы и синтеза автоматических управляющих устройств.

В векторно-матричной форме записи уравнения состояния удобны при синтезе управляющих устройств для режимов регулирования давления в пламенном пространстве печи, расхода топлива и воздуха, температуры рабочего тела.

При рассмотрении вопросов аналитического конструирования регуляторов, оценке важнейших свойств системы, таких как управляемость и наблюдаемость, предлагаемые модели могут быть основой для получения на базе понятия пространства состояний общих показателей эффективности работы системы.

Рассмотренный подход позволяет разрабатывать эффективные алгоритмы анализа и синтеза систем, ориентированные на использование вычислительных машин, и может служить основой аналитического конструирования и реализации регуляторов многосвязных теплоэнергетических установок.

По предлагаемой методике могут быть получены модели участков и систем в целом при регулировании стекловаренных печей и других теплотехнологических объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ешенко А. А. Структурные модели типовых участков (объектов) регулирования расхода и давления рабочей среды // Управление в системах : сб. науч. тр. / Ирк. гос. техн. ун-т. – 2003. –Вып. 5. – С. 93–99.
2. Ешенко А. А. Системы управления технологическими процессами теплоэнергитических установок : учеб. пособие. – Иркутск : НПО «Облмашинформ», 1997. – 145 с.
3. Ешенко А. А. Обобщенные структурные модели трубопровода как элемента регулирования расхода и давления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009.– № 1. – С. 132–135.

УДК 531.36

Иртегов Валентин Дмитриевич,
д-р физ.-мат. наук, с. н. с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел.: (3952) 45-30-92, irteg@icc.ru
Титоренко Татьяна Николаевна,
канд. техн. наук, с. н. с., Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел.: 45-30-53, titor@icc.ru

О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ МЕТОДА РАУСА – ЛЯПУНОВА

Irtegov V.D., Titorenko T.N.

ON ADDITIONAL POSSIBILITIES OF THE ROUTH – LYAPUNOV METHOD

Аннотация. *Для механических систем, допускающих циклические первые интегралы, предложен некоторый способ выделения инвариантных многообразий уравнений движения, аналогичный методике Рауса – Ляпунова, но в отличие от последнего вместо первых интегралов задачи используются «расширенные» характеристические функции. Предложенный способ продемонстрирован на примере механической системы с одной циклической и одной позиционной координатами.*

Ключевые слова: *уравнения движения, циклические интегралы, инвариантные многообразия, метод Рауса – Ляпунова.*

Abstract. *A technique for obtaining invariant manifolds of motion equations of mechanical systems, which admit cyclic first integrals is proposed. This technique is similar to the Routh – Lyapunov method but unlike of the latter it uses «extended» characteristic functions instead of the problem first integrals. The proposed technique is demonstrated by example of a mechanical system with one cyclic and one positional coordinates.*

Keywords: *motion equations, cyclic integrals, invariant manifolds, the Routh – Lyapunov method*

Обсуждаются некоторые дополнительные возможности метода Рауса – Ляпунова для выделения и анализа множеств стационарности механических систем, допускающих циклические интегралы. Рассмотрен класс нелинейных лагранжевых консервативных систем с циклическими координатами, которые с помощью преобразования Лежандра редуцируются к раусовским линейным системам. Приведена процедура восстановления функции Лагранжа по функции Рауса. Рассмотрены задачи качественного анализа таких систем с использованием редукции [1, 2]. Предложен алгоритм выделения инвариантных многообразий уравнений движения на основе подхода, аналогичного методике Рауса – Ляпунова. В отличие от последнего, вместо первых интегралов используются «расширенные» характеристические функции.

1. О системах, редуцируемых к линейным

Не уменьшая общности, рассмотрим лагранжеву механическую систему с одной позиционной и n циклическими координатами, характеристическая функция которой имеет вид:

$$2\tilde{L} = \sum_{i=1}^{n+1}\sum_{j=1}^{n+1} F_{i,j}(q_{n+1})\dot{q}_i\dot{q}_j + cq_{n+1}^2. \qquad (1.1)$$

Система (1.1) допускает n циклических интегралов:

$$\frac{\partial\tilde{L}}{\partial\dot{q}_k} = \sum_{j=1}^{n+1} F_{k,j}(q_{n+1})\dot{q}_j = p_k, \qquad (1.2)$$

$$k = 1,\ldots,n, \quad p_k = \text{const}.$$

Поставим задачу определить гладкие функции $F_{i,j}(q_{n+1})$ $(j,i = 1,\ldots,n+1)$ таким образом, чтобы после преобразования Лежандра функция Рауса стала квадратичной с постоянными коэффициентами. Для этого перепишем уравнения (1.2) в виде

$$\sum_{j=1}^{n} F_{k,j}(q_{n+1})\dot{q}_j = p_k - F_{k,n+1}\dot{q}_{n+1} = \alpha_k \qquad (1.3)$$

$$(k = 1,\ldots,n),$$

где правая часть равенства для сокращения дальнейших формул обозначена α_k.

Найдем циклические скорости $\dot{q}_j$ $(j = 1,\ldots,n)$ из системы (1.3) и построим по известному алгоритму [2] функцию Рауса, соответствующую исходной функции Лагранжа (1.1):

$$\tilde{R} = \tilde{L} - \sum_{k=1}^{n} p_k\dot{q}_k =$$

$$= -\frac{1}{2\Delta}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} p_i p_j a_{i,j} + \frac{\dot{q}_{n+1}}{\Delta}\sum_{i=1}^{n} p_i \sum_{j=1}^{n} F_{j,n+1} a_{j,i} +$$

$$+\frac{1}{2\Delta}\dot{q}_{n+1}^2\left[F_{n+1,n+1}\Delta - \sum_{j=1}^{n} F_{j,n+1}\sum_{k=1}^{n} F_{k,n+1} a_{k,j} \right] + \frac{1}{2} c q_{n+1}^2.$$

Здесь $\Delta = det|F_{k,j}|$ – определитель линейной системы (1.3), $a_{i,j}$ – алгебраические дополнения элементов $F_{i,j}$ матрицы $\|F_{i,j}\|$ системы (1.3).

Потребуем, чтобы функция Рауса $\tilde{R}$ была квадратичной по переменным $\dot{q}_{n+1}, q_{n+1}$. Для этого должны выполняться условия:

$$\frac{a_{i,j}}{\Delta} = m_{i,j} q_{n+1}^2 + n_{i,j} = \beta_{i,j}, \qquad (1.4)$$

$$\sum_{j=1}^{n} F_{j,n+1} a_{j,i} = \omega_i q_{n+1}\Delta \quad (i, j = 1,2,\ldots,n), \qquad (1.5)$$

$$\frac{1}{\Delta}[F_{n+1,n+1}\Delta - \sum_{j=1}^{n} F_{j,n+1}\sum_{k=1}^{n} F_{k,n+1} a_{k,j}] = B, \qquad (1.6)$$

где $m_{i,j}, n_{i,j}, \omega_i, B$ – некоторые постоянные.

Найдем из (1.4)–(1.6) значения $F_{i,j}(q_{n+1})$ $(i, j = 1,\ldots, n+1)$, что позволит нам выписать явно выражение (1.1) и тем самым определить класс лагранжианов, редуцируемых к квадратичным по переменным $q_{n+1}, \dot{q}_{n+1}$ с помощью преобразования Лежандра. Для этого используем известную связь между элементами второй присоединенной матрицы и элементами исходной матрицы $A_{i,j} = F_{i,j}\Delta^{n-2}$, а также выражение для определителя присоединенной матрицы $\det|a_{i,j}| = \Delta^{n-1}$.

Согласно (1.4), $a_{i,j} = \beta_{i,j}\Delta$ и, следовательно,

$$det|a_{i,j}| = det|\Delta\beta_{i,j}| = \Delta^n det|\beta_{i,j}|, \qquad (1.7)$$

$$F_{i,j} = \frac{A_{i,j}}{\Delta^{n-2}} = \frac{1}{\Delta^{n-2}} D_{i,j}\|\Delta\beta_{k,l}\| =$$

$$= \frac{\Delta^{n-1}}{\Delta^{n-2}} D_{i,j}\|\beta_{k,l}\| = \Delta D_{i,j}\|\beta_{k,l}\| \quad (i, j = 1,\ldots, n). \qquad (1.8)$$

Здесь через $D_{i,j}\|\cdot\|$ обозначены алгебраические дополнения элементов соответствующей матрицы. Соотношение (1.7) можно переписать в виде $\Delta^{n-1} = \Delta^n det|\beta_{i,j}|$, откуда $\Delta = det|\beta_{i,j}|^{-1}$.

Последнее равенство и (1.8) позволяют записать искомое выражение для $F_{i,j}$ $(i, j = 1,\ldots, n)$:

$$F_{i,j} = \frac{D_{i,j}\|\beta_{k,l}\|}{det\|\beta_{i,j}\|} \quad (i, j = 1,\ldots,n). \qquad (1.9)$$

Аналогично, разрешая уравнения (1.5) относительно $F_{k,n+1}$, получим выражения для этих коэффициентов:

$$F_{k,n+1} = q_{n+1}\sum_{j=1}^{n}\omega_j F_{j,k} =$$

$$= q_{n+1}\sum_{j=1}^{n}\omega_j \frac{D_{k,j}\|\beta_{m,l}\|}{det\|\beta_{m,l}\|} \quad (k = 1,2,\ldots,n). \qquad (1.10)$$

С помощью уравнения (1.6) найдем выражение для $F_{n+1,n+1}$:

$$F_{n+1,n+1} = B + q_{n+1}^2 \sum_{i,j=1}^{n}\omega_i\omega_j \frac{D_{i,j}\|\beta_{m,l}\|}{det\|\beta_{m,l}\|}. \qquad (1.11)$$

Таким образом доказано, что система с лагранжианом (1.1), коэффициенты $F_{i,j}$ которой определяются формулами (1.9)–(1.11), редуцируется к квадратичной функции Рауса:

$$2\tilde{R} = B\dot{q}_{n+1}^2 + 2\sum_{j=1}^{n} p_j\omega_j q_{n+1}\dot{q}_{n+1} -$$

$$-\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} p_i p_j (m_{i,j} q_{n+1}^2 + n_{i,j}) + c q_{n+1}^2. \qquad (1.12)$$

Уравнение движения системы, определяемое функцией Рауса $\tilde{R}$, имеет вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\tilde{R}}{\partial\dot{q}_{n+1}}\right) - \frac{\partial\tilde{R}}{\partial q_{n+1}} = B\ddot{q}_{n+1} +$$

$$+\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} p_i p_j m_{i,j} - c\right) q_{n+1} = 0. \qquad (1.13)$$

Уравнение (1.13), как и функция $\tilde{R}$, содержит n параметров и определяет движение на каждом интегральном многообразии семейства первых циклических интегралов системы (1.1) при фиксированных значениях постоянных p_j. Обратим внимание на то, что данное уравнение не содержит параметров ω_j, входящих в функцию Рауса $\tilde{R}$. Таким образом, уравнению (1.13) соответствует целое семейство функций Рауса и, следовательно, Лагранжа. Очевидно, при $\omega_j = 0$ $(j = 1,\ldots,n)$ функции (1.12) можно сопоставить функцию Рауса

$$2R = B\dot{q}_{n+1}^2 - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} p_i p_j (m_{i,j} q_{n+1}^2 + n_{i,j}) + c q_{n+1}^2,$$

дифференциальные уравнения Рауса которой также имеют вид (1.13).

Функцию R будем называть базовой, а функцию $\tilde{R}$ (1.12) – расширенной. Ясно, что для базовой функции Рауса с помощью приведенного выше алгоритма можно записать соответствую-

щую функцию Лагранжа. Для этого достаточно в формулах для коэффициентов $F_{i,j}$ (1.9)–(1.11) искомой функции положить $\omega_j = 0$ $(j = 1,\ldots,n)$.

Уравнения Лагранжа, определяемые функцией (1.1), со значениями коэффициентов, найденными выше, имеют вид

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial\tilde{L}}{\partial\dot{q}_{n+1}}\right)-\frac{\partial\tilde{L}}{\partial q_{n+1}}=\sum_{j=1}^{n+1}F_{j,n+1}\ddot{q}_j+\frac{\partial F_{n+1,n+1}}{\partial q_{n+1}}\dot{q}_{n+1}^2-$$

$$-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\partial F_{i,j}}{\partial q_{n+1}}\dot{q}_i\dot{q}_j-cq_{n+1}=0.$$

Формулы для линейных по скоростям первых интегралов

$$\sum_{j=1}^{n+1}F_{k,j}(q_{n+1})\dot{q}_j=p_k \qquad (k=1,\ldots,n)$$

после подстановки значений $F_{i,j}$, как и выражения для дифференциальных уравнений, становятся громоздкими и здесь не приведены явно.

2. Инвариантные многообразия исходной и редуцированной системы

Рассмотрим задачу выделения инвариантных множеств уравнений Лагранжа и Рауса как задачу анализа множеств стационарности «расширенных» характеристических функций указанных систем. Для демонстрации предлагаемого подхода ограничимся для простоты семейством «расширенных» лагранжианов с одной позиционной и одной циклической координатой

$$2\tilde{L}=k\dot{q}_2^2+(aq_2^2+b)^{-1}(\dot{q}_1+f(q_2)\dot{q}_2)^2+dq_2^2,$$

содержащих произвольную гладкую функцию $f(q_2)$.

Соответствующая $\tilde{L}$ система дифференциальных уравнений допускает циклический первый интеграл:

$$\frac{\partial\tilde{L}}{\partial\dot{q}_1}=(aq_2^2+b)^{-1}(\dot{q}_1+f(q_2)\dot{q}_2)=p. \qquad (2.1)$$

Данному семейству характеристических функций $\tilde{L}$, по известному алгоритму [2], можно сопоставить следующее семейство функций Рауса:

$$\tilde{R}=\tilde{L}-p\dot{q}_1=$$

$$=\frac{1}{2}\left[k\dot{q}_2^2+2pf(q_2)\dot{q}_2-p^2(aq_2^2+b)+dq_2^2\right]. \qquad (2.2)$$

Фактически, это семейство является расширением базовой функции Рауса

$$2R=k\dot{q}_2^2-p^2(aq_2^2+b)+dq_2^2,$$

к которой добавлена полная производная некоторой функции $S(q_2)$:

$$f(q_2)\dot{q}_2=\frac{dS(q_2)}{dq_2}\dot{q}_2 \text{ или } f(q_2)=\frac{dS(q_2)}{dq_2}.$$

Нетрудно проверить, что дифференциальное уравнение Рауса будет одинаково для функций R и $\tilde{R}$:

$$k\ddot{q}_2+(p^2a-d)q_2=0. \qquad (2.3)$$

Замечание. Располагая алгоритмом первой части работы, можно задать «расширенную» функцию Рауса $\tilde{R}$ (2.2) и восстановить по ней семейство лагранжианов $\tilde{L}$, указанных выше.

Поставим задачу о выделении и качественном анализе стационарных множеств уравнений Рауса и Лагранжа по методике Рауса – Ляпунова, используя вместо первых интегралов «расширенные» характеристические функции.

2.1. О стационарных множествах редуцированной системы. Начнем с анализа стационарных множеств уравнения Рауса (2.3), используя для этого «расширенную» функцию Рауса $\tilde{R}$ (2.2) следующим образом. Запишем необходимые условия экстремума $\tilde{R}$:

$$\frac{\partial\tilde{R}}{\partial\dot{q}_2}=k\dot{q}_2+pf(q_2)=0,$$

$$\frac{\partial\tilde{R}}{\partial q_2}=pf'(q_2)\dot{q}_2-(p^2a-d)q_2=0. \qquad (2.1.1)$$

Потребуем, чтобы полученные уравнения были зависимыми. Для этого исключим скорость из второго уравнения с помощью первого. В результате получим условие вырожденности системы (2.1.1):

$$p^2f(q_2)f'(q_2)+k(p^2a-d)q_2=0. \qquad (2.1.2)$$

Нетрудно видеть, что при значениях $f(q_2)$, удовлетворяющих последнему дифференциальному уравнению, первое уравнение (2.1.1)

$$k\dot{q}_2+pf(q_2)=0 \qquad (2.1.3)$$

определяет стационарное множество рассматриваемой системы уравнений.

Проинтегрировав (2.1.2), мы получаем алгебраическое уравнение

$$2\hat{H}=p^2f^2(q_2)-k(d-p^2a)q_2^2=0 \qquad (2.1.4)$$

для нахождения интересующих нас значений $f(q_2)$.

Очевидное сопоставление позволяет утверждать, что (2.1.4) есть уравнение Гамильтона – Якоби [3] для системы Гамильтона

$$\dot{p}_1=k(d-p^2a)q_2=0, \quad k\dot{q}_2=p_1,$$

соответствующей уравнению Рауса (2.3).

В терминологии [3], уравнение (2.1.2) представляет систему уравнений Гамильтона – Якоби при $n=1$:

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial q_2} = p^2 f(q_2) f'(q_2) + k(p^2 a - d) q_2 = 0.$$

Уравнение (2.1.4) имеет два решения:

$$f(q_2) = \pm \frac{1}{p} \sqrt{k(d - p^2 a)}\, q_2.$$

Таким образом доказано

Утверждение 1. *Два многообразия*

$$k\dot{q}_2 \pm \sqrt{k(d - p^2 a)}\, q_2 = 0 \qquad (2.1.5)$$

доставляют стационарное значение соответственно двум расширенным функциям Рауса:

$$2\tilde{R}_{1,2} = k\dot{q}_2^2 \pm \sqrt{k(d - p^2 a)}\, q_2 \dot{q}_2 - p^2 (a q_2^2 + b) + d q_2^2.$$

Поставим теперь вопрос об инвариантности найденных стационарных множеств, действуя по определению инвариантного многообразия.

Производная от уравнения (2.1.3), вычисленная на данном множестве в силу уравнения Рауса (2.3), записывается так:

$$k\ddot{q}_2 + pf'(q_2)\dot{q}_2 = -k(p^2 a - d) q_2 - p^2 f(q_2) f'(q_2).$$

Поскольку данное выражение совпадает с левой частью системы Гамильтона – Якоби (2.1.2), полученной ранее, и, следовательно, равно нулю на множествах (2.1.5), то это и служит основанием считать инвариантными множества, определяемые уравнениями (2.1.5) для уравнения Рауса (2.3). Будем называть такие многообразия (по понятным причинам) инвариантными многообразиями стационарных движений (ИМСД).

Приведенные рассуждения позволяют считать доказанным

Утверждение 2. *Для того чтобы уравнение Рауса* (2.3) *имело инвариантные многообразия* (2.1.5), *доставляющие стационарное значение расширенной функции Рауса* $\tilde{R}$ (2.2), *функция* $f(q_2)$, *определяющая расширение* $\tilde{R}$, *должна удовлетворять уравнению Гамильтона – Якоби* (2.1.4).

Покажем, что найденные для уравнения Рауса ИМСД могут быть «подняты» в фазовое пространство лагранжевой системы как ИМСД.

2.2. О стационарных множествах лагранжевой системы. Построим функцию K, вычитая из расширенной функции Лагранжа слагаемое $p\dot{q}_1$:

$$K = \tilde{L} - p\dot{q}_1 = \frac{1}{2}\left[k\dot{q}_2^2 + (a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2)^2 + d q_2^2\right] - p\dot{q}_1, \qquad (2.2.1)$$

и запишем условия ее стационарности:

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_1} = (a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2) - p = 0,$$

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_2} = k\dot{q}_2 + (a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2) f(q_2) = 0,$$

$$\frac{\partial K}{\partial q_2} = (a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2) f'(q_2)\dot{q}_2 - \qquad (2.2.2)$$

$$- a q_2 (a q_2^2 + b)^{-2}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2)^2 + d q_2 = 0$$

Исключив скорость $\dot{q}_1$ с помощью первого уравнения из остальных, получим

$$\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_2} = k\dot{q}_2 + pf(q_2) = 0,$$

$$\frac{\partial K}{\partial q_2} = pf'(q_2)\dot{q}_2 - a q_2 p^2 + d q_2 = 0.$$

Как и в раусовском случае, потребуем, чтобы рассматриваемые уравнения были зависимы. Для этого исключим из второго уравнения скорость с помощью первого. В результате получим следующее условие вырожденности системы (2.2.2):

$$p^2 f(q_2) f'(q_2) + k(p^2 a - d) q_2 = 0. \qquad (2.2.3)$$

Как легко видеть, оно совпадает с аналогичным условием (2.1.2) для раусовского случая.

Проинтегрировав (2.2.3), мы получаем, как и выше, алгебраическое уравнение

$$p^2 f^2(q_2) = k(d - p^2 a) q_2^2$$

для нахождения интересующих нас значений $f(q_2)$. Следовательно, можно утверждать, что при значениях $f(q_2)$, удовлетворяющих последнему уравнению (равносильно уравнению (2.1.4)), стационарными множествами для функции K будут множества, определяемые уравнениями:

$$\begin{aligned} &k\dot{q}_2 + p f(q_2) = 0, \\ &(a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2) - p = 0 \end{aligned} \qquad (2.2.4)$$

или после подстановки найденных значений $f(q_2)$:

$$k\dot{q}_2 \pm q_2 \sqrt{k(d - ap^2)} = 0,$$

$$(a q_2^2 + b)^{-1}(\dot{q}_1 \pm \sqrt{k(d - ap^2)}\,\dot{q}_2) - p = 0.$$

Соответствующие функции K, а значит и $\tilde{L}$, имеют здесь вид

$$K_{1,2} = k\dot{q}_2^2 + (a q_2^2 + b)^{-1}\left(\dot{q}_1 \pm q_2 \sqrt{k(d - ap^2)}\,\dot{q}_2\right)^2 + d q_2^2 - p\dot{q}_1 = \tilde{L}_{1,2} - p\dot{q}_1.$$

Последние формулы показывают, что уравнения стационарного множества функции K получаются, если к уравнению стационарного множества функции $\tilde{R}$ (2.2) добавить циклический интеграл (2.1).

Покажем, что уравнения (2.2.4) определяют инвариантные многообразия уравнений Лагранжа, соответствующих «расширенной» функции Лагранжа $\tilde{L}$ (при условии (2.1.4) на $f(q_2)$).

Уравнения Лагранжа записываются так:

$$k\ddot{q}_2 + aq_2(aq_2^2+b)^{-2}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2)^2 - dq_2 = 0,$$
$$(aq_2^2+b)^{-1}(\dot{q}_1 + f(q_2)\dot{q}_2) - p = 0. \quad (2.2.5)$$

Здесь из первого уравнения с помощью второго уравнения и соотношения (2.2.3) исключены $\ddot{q}_1$ и $f'(q_2)$.

При указанных значениях $f(q_2)$ уравнения (2.2.5) принимают вид:

$$k\ddot{q}_2 + aq_2(aq_2^2+b)^{-2}\left(\dot{q}_1 \pm q_2\sqrt{k(d-ap^2)}\dot{q}_2\right)^2 - dq_2 = 0,$$
$$(aq_2^2+b)^{-1}(\dot{q}_1 \pm q_2\sqrt{k(d-ap^2)}\dot{q}_2) - p = 0.$$

Сказанное справедливо и для базовых уравнений Лагранжа при соответствующем значении циклического интеграла.

Проведем доказательство сначала для случая уравнений с «расширенным» лагранжианом

$$2\tilde{L}_{1,2} = k\dot{q}_2^2 + (aq_2^2+b)^{-1}\left(\dot{q}_1 \pm \sqrt{k(d-ap^2)}\dot{q}_2\right)^2 + dq_2^2,$$

действуя по определению инвариантного многообразия.

Производная от первого уравнения уравнений (2.2.4), вычисленная на этом множестве в силу уравнения Лагранжа (2.2.5), записывается так:

$$\frac{d}{dt}(k\dot{q}_2 + pf(q_2)) = k\ddot{q}_2 + p\,f'(q_2)\dot{q}_2.$$

После исключения из этого выражения производных $\dot{q}_2, \ddot{q}_2$ с помощью уравнений движения (2.2.5) и многообразия (2.2.4), будем иметь:

$$\frac{d}{dt}(k\dot{q}_2 + p\,f(q_2)) = p^2 f(q_2) f'(q_2) - k(d - p^2 a)q_2.$$

Поскольку полученное выражение совпадает с условием вырожденности уравнений стационарности K и обращается в нуль при значении $f(q_2)$, которое соответствует обсуждаемому многообразию, то исследуемое многообразие инвариантно. Ясно, что добавление к уравнению, определяющему инвариантное многообразие первого интеграла, снова будет определять инвариантное многообразие.

Проведем аналогичное доказательство в случае базового лагранжиана:

$$2L = k\dot{q}_2^2 + (aq_2^2+b)^{-1}\dot{q}_1^2 + dq_2^2.$$

Соответствующие уравнения Лагранжа записываются здесь так:

$$k\ddot{q}_2 + aq_2(aq_2^2+b)^{-2}\dot{q}_1^2 - dq_2 = 0,\ (aq_2^2+b)^{-1}\dot{q}_1 = p.$$

Производная от первого уравнения многообразия, вычисленная на данном многообразии в силу выписанных уравнений движения, имеет вид

$$k\ddot{q}_2 + p\,f'(q_2)\dot{q}_2 = -aq_2(aq_2^2+b)^{-2}\dot{q}_1^2 +$$
$$+ dq_2 - \frac{p^2}{k} f'(q_2) f(q_2).$$

Исключив скорость $\dot{q}_1$ из последнего выражения с помощью циклического интеграла, получим

$$k\ddot{q}_2 + pf'(q_2)\dot{q}_2 = -p^2 aq_2 + dq_2 - \frac{p^2}{k} f'(q_2) f(q_2).$$

Это выражение обращается в нуль при значениях $f(q_2)$, соответствующих нашим многообразиям. Тем самым инвариантность рассматриваемых многообразий, определяемых уравнениями

$$k\dot{q}_2 \pm \sqrt{k(d-ap^2)}q_2 = 0, \quad (aq_2^2+b)^{-1}\dot{q}_1 = p,$$

доказана и для базовых уравнений Лагранжа.

3. Заключение

Таким образом, показано, что использование «расширенных» характеристических функций позволяет проводить анализ консервативных систем на базе стандартной техники выделения вырожденных стационарных множеств. Интересной при этом оказывается аналогия с формализмом Гамильтона – Якоби, которая естественно возникает при нахождении условий вырожденности уравнений стационарности и сводится к определению при данном подходе расширяющей функции. Нетрудно видеть, что функции, достигающие стационарного значения на выделяемых так инвариантных многообразиях, могут быть использованы как функции Ляпунова для получения достаточных условий устойчивости этих многообразий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов А. В., Матвеев И.С. Пуассоновы структуры и алгебры Ли в гамильтоновой механике. – Ижевск : ИД «Удмурт. ун-т», 1999. – 460 с.
2. Арнольд В. И., Козлов В. В., Нейштадт А. И. Математические аспекты классической и небесной механики // Итоги науки и техники. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – М. : ВИНИТИ, 1985. – Т. 3. – С. 5–303.
3. Гельфанд И. М., Фомин С. В. Вариационное исчисление. М.–Л. : ГИФ, 1961. – 228 с.

УДК 629.4.015 + 625.1.03

Цвик Лев Беркович,
д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: tsvik_1@mail.ru
Зеньков Евгений Вячеславович,
аспирант, Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет,
e-mail: jovanny1@yandex.ru
Пыхалов Анатолий Александрович,
д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения,
e-mail: pikhalov_aa@irgups.ru

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ НА ВИД ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

L.B. Tsvik, E.V. Zenkov, A.A. Pikhalov

INFLUENCE OF THE GEOMETRICAL CHARACTERISTICS OF PLANO-CYLINDER BENCHMARKS WITH STRESS CONCENTRATORS ON THEIR STRESS MODE

Аннотация. *Рассматриваются лабораторные образцы для механических испытаний в условиях их циклического нагружения. Представлен анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) плоскоцилиндрических образцов, имеющих концентраторы напряжений в виде U-образных канавок. Показано, что образцы позволяют воспроизводить мягкий вид НДС конструкций, характеризуемый отрицательным значением коэффициента жесткости этого вида. В частности, НДС кромок отверстий сосудов давления, НДС прессовых соединений, изготовленных с натягом, и в других случаях, характеризуемых отрицательными значениями главных напряжений.*

Ключевые слова: *жесткость напряженного состояния, вычислительный эксперимент, плоскоцилиндрический образец, безразмерный конструктивный параметр, метод конечных элементов.*

Abstract. *The laboratory benchmarks for mechanical tests in the conditions of their cyclic loading are considered. The numerical analysis mode of deformation of the plano-cylinder benchmarks of the new form having concentrators of stress in the form of U-shaped flutes is presented. It is shown that benchmarks allow reproduce a soft kind of deformation the constructions mode, characterized by negative value of stiffness coefficient of stress of this kind. In particular, of the deformation mode of the pressure vessels openings edges, of the deformation mode press the bundling made with tightness and in other cases characterized by negative values of principal stresses.*

Keywords: *stiffness coefficient of stress, computing experiment, plano-cylinder benchmark dimensionless structural characteristic, finite element method.*

Машиностроительные конструкции в эксплуатационных условиях, как правило, подвергаются комплексу повторяющихся (циклических) нагрузок. Их НДС характеризуется концентрацией напряжений вблизи конструктивных неоднородностей (отверстий, выступов, пазов и т. п.). Возникающее вблизи такого концентратора НДС, как правило, двумерно или трёхмерно. Оно и определяет ресурс работы конструкции при циклическом нагружении [1].

Вид НДС, возникающего в некоторой точке конструкции под нагрузкой (далее – точке наблюдения), характеризуется величиной коэффициента его жёсткости $П$, равного отношению первого инварианта тензора напряжений ко второму [2]

$$П = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \qquad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, возникающие в точке наблюдения; σ_i – эквивалентное напряжение, определяемое формулой

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}\ . \qquad (2)$$

Известно [3–5], что увеличение коэффициента жёсткости вида НДС в некоторой зоне конструкции может привести к тому, что очаг разрушения перемещается в эту зону, несмотря на то, что

уровень напряжений в ней не является максимальным для конструкции в целом. Существенно, что такое перемещение может происходить как в случае циклического характера нагружения конструкции [3], так и в случае её квазистатического разрушения [4]. Указанное обстоятельство необходимо учитывать на этапе проектирования как конструкции в целом, так и её местных усилений, снижающих уровень напряжений в местах конструктивных неоднородностей.

Одной из проблем, возникающих при экспериментальном исследовании сопротивления усталостному разрушению в лабораторных условиях, является трудность создания в соответствующих лабораторных образцах мягкого НДС, характеризуемого отрицательными значениями величины *П*. Такое НДС характеризует деформирование ряда ответственных элементов высоконагруженных конструкций. В частности, кромок отверстий в стенках сосудов высокого давления, в посадках с натягом, например в зоне контакта колеса и оси колёсной пары железнодорожного вагона, при контактном силовом взаимодействии элементов конструкций, в некоторых типах опор и в ряде других случаев.

В данной работе рассматриваются особенности деформирования лабораторных образцов для усталостных механических испытаний (рис. 1) до разрушения [6], позволяющих упростить решение отмеченной проблемы [7]. Образец представляет собой круглую пластину, опёртую в процессе испытаний по наружной круговой кромке поверхности опирания (на рис. 1 поверхность опирания – нижняя). На противоположных плоских сторонах пластины имеются две U-образные канавки, криволинейные поверхности которых представляют собой цилиндрические поверхности с прямолинейными образующими, ориентированными у рассматриваемых канавок взаимно перпендикулярно. Ширина и глубина канавок могут быть разными и выбираются из условия моделирования особенностей НДС конструкции, усталостная прочность которой оценивается в процессе испытаний образца. В данной работе в качестве таких особенностей при численном моделировании рассматривались значения коэффициентов K_σ и *П*. Значение коэффициента *П* определялось при этом формулой (1), величина K_σ – коэффициент концентрации эквивалентных напряжений – формулой

$$K_\sigma = \frac{\sigma_i^{\max}}{\sigma_i^{ном}}, \qquad (3)$$

где σ_i^{max} – эквивалентные напряжения в точке наблюдения рабочей зоны образца; $\sigma_i^{ном}$ – номинальные эквивалентные напряжения – интенсивность напряжений в центре соответствующего (по диаметру и толщине) аналогично нагруженного плоскоцилиндрического образца без канавок-концентраторов на его сторонах (далее – исходной круглой пластины). Предполагается, что при проведении испытаний лабораторного образца НДС оцениваемой конструкции предварительно исследовано с помощью численного моделирования, а соответствующие значения коэффициентов K_σ и *П* известны. Выбор указанных коэффициентов в качестве критериев подобия лабораторного образца

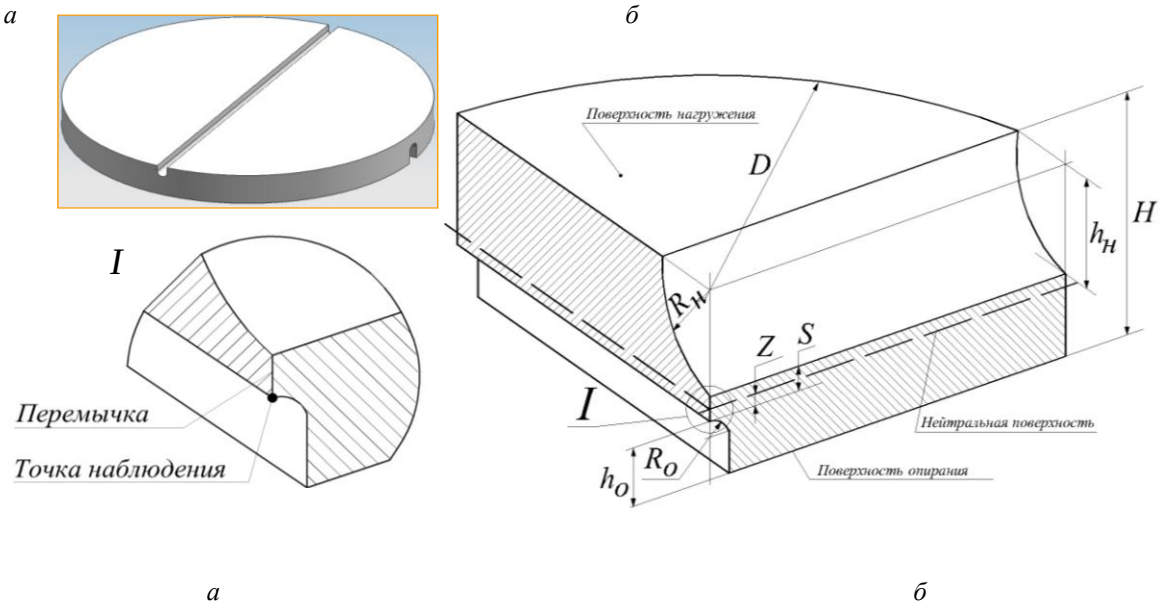


Рис. 1. Конструктивная схема плоскоцилиндрического образца.
***а* – общий вид образца;**
***б* – четверть образца, высеченная из него двумя плоскостями симметрии; *I* – рабочая зона образца**

и оцениваемой конструкции определяется тем, что значения коэффициентов $П$ и K_σ, являются физически значимыми инвариантами полей напряжений, возникающих в моделируемой конструкции и определяющих её прочность в условиях циклического нагружения.

В процессе испытаний образца на стороне, противоположной стороне опирания, пластина нагружается давлением, равномерно распределённым в пределах окружности относительно малого радиуса. На рис. 1 поверхность нагружения – верхняя. Центр окружности нагружения располагается на оси симметрии исходной круглой пластины. Её диаметр в процессе описанных далее численных исследований НДС плоскоцилиндрических образцов принимался равным четверти диаметра пластины D. Доведение таких образцов до разрушения циклически изменяющимся давлением на поверхности нагружения позволяет оценить усталостную прочность конструкции с учётом вида НДС в очаге её возможного разрушения с учётом соответствующего характера концентрации напряжений в этом очаге.

Целью работы является анализ зависимостей изменения вида НДС рассматриваемых образцов при изменении ширины и глубины канавок на его поверхностях. Знание таких зависимостей позволяет, в частности, осуществить обоснованный выбор основных размеров образца для экспериментального изучения сопротивления различных материалов и изготовленных из них конструктивных узлов усталостному разрушению.

Анализ НДС образцов осуществлялся по результатам их КЭ-моделирования (рис. 2) с помощью конечных элементов, имеющих форму гексаэдра, что упростило снижение погрешности КЭ-моделирования. По результатам анализа различных вариантов определялись зависимости величин главных напряжений в точке наблюдения рабочей зоны от глубины и ширины канавок.

Рис. 2. Пример конечно-элементной дискретизации рабочей зоны образца

Моделирование НДС выбранных вариантов выполнялось с помощью программного средства MSC/*Nastran* [8]. Рассматриваемый образец и его состояние под нагрузкой симметричны относительно плоскостей симметрии U-образных канавок. По этой причине в вычислительных экспериментах осуществлялось моделирование только четверти образца, что позволило существенно снизить требования к используемым вычислительным ресурсам при обеспечении необходимой точности вычислений.

Геометрические характеристики образцов выбирались из условия моделирования величин K_σ и $П$, характерных для реальных машиностроительных конструкций. Как правило [9, 10], их материал в эксплуатационных условиях деформируется упруго, а величина K_σ не превосходит значения, равного четырём. Принималось также, что материал образца – конструкционная сталь, для которой модуль Юнга E = 210000 МПа и коэффициент Пуассона ν = 0,3. Значения величины $П$ принимались не выходящими за границы диапазона [– 2; 1], что подтверждается анализом НДС типичных конструктивных узлов, в частности патрубковых зон сосудов давления [10]. В последнем случае рассматривался диапазон значений внутренних давлений в сосуде от 0,1 до 100 МПа. Таким образом, рассматривались конструктивные варианты образцов, для которых значения характеристик НДС одновременно удовлетворяли неравенствам

$$-2 \le П \le 1;\ K_\sigma \le 4. \qquad (4)$$

Величины D и H принимались в процессе вариантных исследований неизменными и равными D = 200 мм, H = 20 мм. В вычислительных экспериментах первоначально рассматривались следующие диапазоны изменения безразмерных конструктивных параметров:

$$\rho_н = \frac{R_н}{H} \in [0{,}025;\ 0{,}15]; \qquad \rho_o = \frac{R_o}{H} \in [0{,}025;\ 0{,}2];$$

$$h = \frac{h_н}{H} \in [0{,}025;\ 0{,}35]; \quad s = \frac{S}{H} \in [0{,}05;\ 0{,}15]. \qquad (5)$$

В этих соотношениях H – общая толщина плоскоцилиндрического образца (рис. 1), S – толщина его перемычки в рабочей зоне, $R_н$ – радиус канавки на стороне нагружения, R_o – радиус канавки на стороне опирания, $h_н$ – глубина канавки на стороне нагружения. Безразмерные параметры имели, соответственно, следующий смысл: $\rho_н$ – относительный радиус канавки на стороне нагружения; ρ_o – относительный радиус канавки на стороне опирания; $h_н$ – относительная глубина канавки на стороне нагружения; s – относительная толщина перемычки.

Диапазоны изменений (5) выбирались на первом этапе моделирования с целью выявления в них конструктивных параметров образцов, характеризуемых значениями $П$ и K_σ, удовлетворяющими неравенствам (4).

При выборе конструктивных параметров об-

разцов, обеспечивающих выполнение неравенств (4), основное внимание в данной работе было уделено выполнению первого из них. Обеспечение значения величины *П*, близкое к минус 1 при значениях K_σ, превышающих 1,5, требует, как правило, рассмотрения плоскоцилиндрических образцов большей толщины (при неизменном наружном диаметре исходной круглой пластины) либо канавок более сложной формы (с торообразной поверхностью или V-образным сечением [7]), что выходит за рамки данной работы.

В процессе моделирования на наружной кромке поверхности опирания задавались краевые условия, соответствующие её закреплению в пространстве по всем координатным направлениям. Данный тип краевых условий, не моделируя точно реальные условия опирания в процессе испытаний, позволяет проанализировать качественно влияние каждого из конструктивных параметров на основные характеристики НДС образца.

В процессе численного моделирования было рассмотрено около 100 конструктивных вариантов образцов с U-образными канавками, выполненными в соответствии с рис. 1, в которых выбранные промежуточные значения конструктивных параметров $\rho_н$, $\rho_о$, h, s из диапазона (5) сочетались по схеме «каждый с каждым». Относительная вычислительная погрешность при численном определении значений рассматриваемых эквивалентных напряжений в зоне перемычки не превышала 5 % [8].

Для выявления изучаемых зависимостей каждый из параметров варьировался при фиксированных значениях остальных. Значения параметров $\rho_н$, $\rho_о$ и h рассматривались в диапазоне от $\rho_н^{min}$ до $\rho_о^{max}$ и от h^{min} до h^{max}, где величины с индексами *max* и *min* – соответствующие границы диапазонов изменения параметров (5). Выбранные для осуществления вычислительного эксперимента значения параметров рассматривались далее как узловые для исследуемых зависимостей. Обработка полученных результатов КЭ-моделирования позволила описать их графически (см. рис. 3–6).

На рис. 3 представлено распределение значений коэффициента жесткости *П* в зависимости от относительной величины радиуса канавки на стороне нагружения $\rho_н$ для фиксированного значения радиуса канавки на стороне опирания при $\rho_о = \rho_о^{min} = 0{,}025$ и $\rho_о = \rho_о^{max} = 0{,}2$. Величины относительной толщины перемычки принимались при этом равными $s = s^{min} = 0{,}05$ (рис. 3, *а*) и $s = s^{max} = 0{,}15$ (рис. 3, *б*).

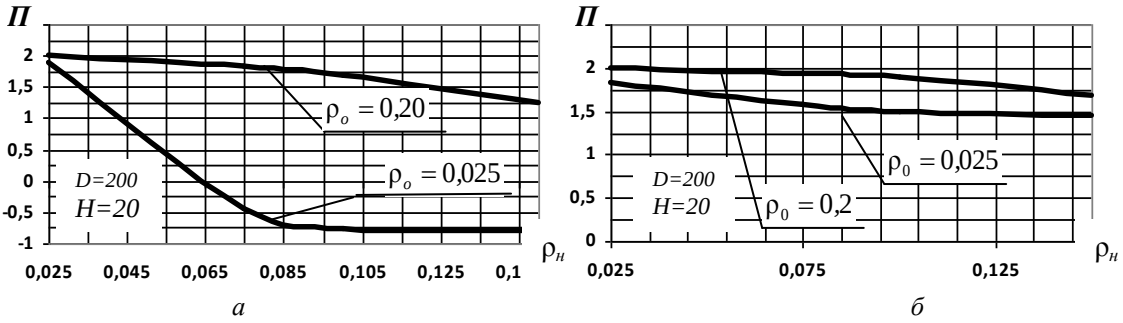
Как видно из рисунка 3, *а*, с увеличением ширины канавки на стороне нагружения НДС в точке наблюдения рабочей зоны образца смягчается. В случае наименьшей толщины перемычки *S* ($s = 0{,}05$, рис. 3, *а*) жесткость НДС в точке наблюдения падает до минимального значения. Величина *П* уменьшается в этом случае от 2 (при $\rho_н = \rho_н^{min} = 0{,}025$) до 0,6 (при $\rho_н = \rho_н^{max} = 0{,}15$).

Анализируя результаты, представленные на рис. 3–6, можно отметить, что для смягчения НДС в рабочей зоне образца необходимо подбирать ширину канавки на стороне нагружения существенно превышающей ширину канавки на стороне опирания. Можно отметить также, что на значение коэффициента жёсткости *П* существенно влияет как изменение толщины перемычки, так и её положение относительно срединной плоскости рассматриваемого образца. Последнее обстоятельство связано с тем, что срединная поверхность исходной круглой пластины отделяет зону, в которой материал исходной пластины радиальными напряжениями сжат, от зоны, в которой материал пластины указанными напряжениями растянут. В соответствии с этим смещение перемычки в указанную зону сжатия приводит к смягчению в ней вида НДС и уменьшению значения величины *П*.

Результаты описанных вариантных расчётов исследуемого напряжённого состояния позволили оценить зависимости коэффициентов *П* и K_σ от всех геометрических параметров образца. Зависимости, описывающие влияние ширины канавки на стороне опирания на жёсткость НДС образца в его рабочей зоне, приведены на рис. 4. Соответствующие изменения величины *П* рассмотрены при минимальной ширине этой канавки ($\rho_о = \rho_о^{min} = 0{,}025$) и при максимальной ($\rho_о = \rho_о^{max} = 0{,}15$). Величина относительной толщины перемычки определялась при этом её минимальным значением $s = s^{min} = 0{,}05$ (рис. 4, *а*) и максимальным $s = s^{max} = 0{,}15$ (рис. 4, *б*).

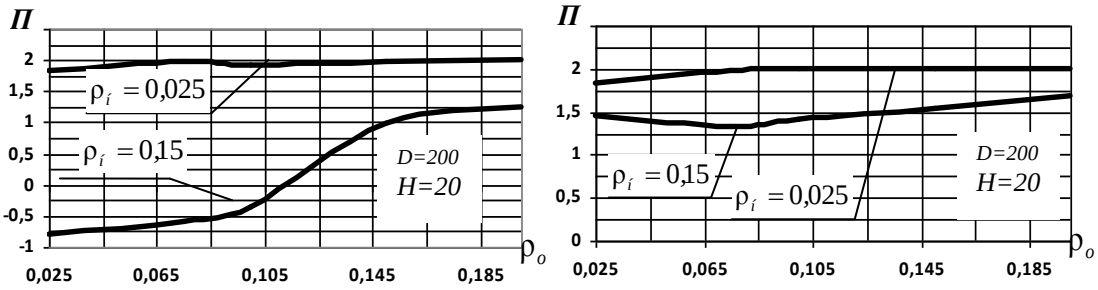
Из рассматриваемых рисунков следует, что в случае максимально широкой канавки на стороне нагружения и, одновременно, при минимальном значении ширины канавки на стороне опирания и, одновременно, при достаточно тонкой и достаточно высоко расположенной перемычке – при выполнении этих условий в точке наблюдения возникает относительно мягкое НДС. Значение коэффициента *П* близко в этом случае к –1, а отрицательность значения коэффициента *П* сохраняется, как показывают результаты КЭ-моделирования, на расстоянии от точки наблюдения не менее полутолщины (в направлении нижней канавки) – толщины (в направлении канавки на стороне нагружения) исходной круглой пластины и сохраняется по всей толщине перемычки.

Влияние на коэффициент *П* глубины канавки на стороне нагружения (влияние параметра h) при минимальной ширине верхней канавки ($\rho_н = \rho_н^{min} = 0{,}025$, показано на рис. 5.



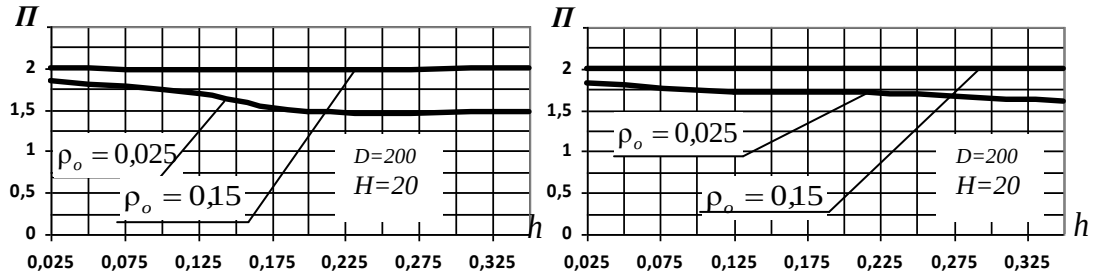
а *б*

Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости *П* от ширины канавки на стороне нагружения для фиксированных параметров $s = s^{min} = 0,05$ (*а*) и $s = s^{max} = 0,15$ (*б*)



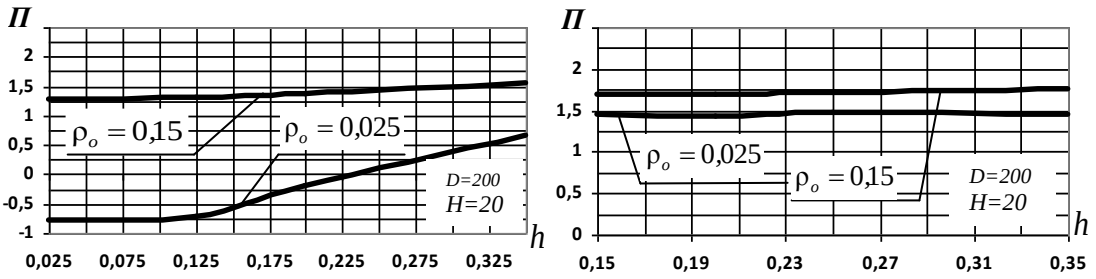
а *б*

Рис. 4. Зависимость коэффициента жесткости *П* от радиус канавки на стороне опирания для фиксированных параметров $s = s^{min} = 0,05$ (*а*) и $s = s^{max} = 0,15$ (*б*)



а *б*

Рис. 5. Зависимость коэффициента жесткости *П* от глубина канавки на стороне нагружения для фиксированных значений $s = s^{min} = 0,05$ (*а*) и $s = s^{max} = 0,15$ (*б*) при $\rho_н = \rho_н^{min} = 0,025$



а *б*

Рис. 6. Зависимость коэффициента жесткости *П* от глубины канавки на стороне нагружения для фиксированных значений $s = s^{min} = 0,05$ (*а*) и $s = s^{max} = 0,15$ (*б*) при $\rho_н = \rho_н^{max} = 0,15$

Из приведённых результатов следует, что эта глубина на жёсткость *П* влияет в рассмотренных условиях незначительно. Картина существенно изменяется для случая максимального значения ширины канавки на стороне нагружения ($\rho_н^{max} = 0,15$, рис. 6). В этом случае в точке наблю-

дения рабочей зоны образца при $s = s^{min}$ может возникать мягкий вид НДС.

Отметим ещё раз, что наибольшую трудность при моделировании НДС различных конструкций с помощью лабораторных образцов вызывает моделирование относительно жёсткого вида такого НДС. В соответствии с этим и с выявленными особенностями их НДС процесс исследования был скорректирован следующим образом:

1) рассмотрение конструктивных вариантов, осуществляемое с помощью МКЭ, было ограничено образцами, имеющими одну и ту же минимальную толщину перемычки S; исходя из требований технологии изготовления образцов и в соответствии с принятыми размерами $D = 200$ мм и $H = 20$ мм было принято значение $S = 2$ мм;

2) вместо двух безразмерных параметров, характеризующих глубины канавок, был введён один такой параметр, характеризующий расположение перемычки относительно срединной поверхности исходной круглой пластины.

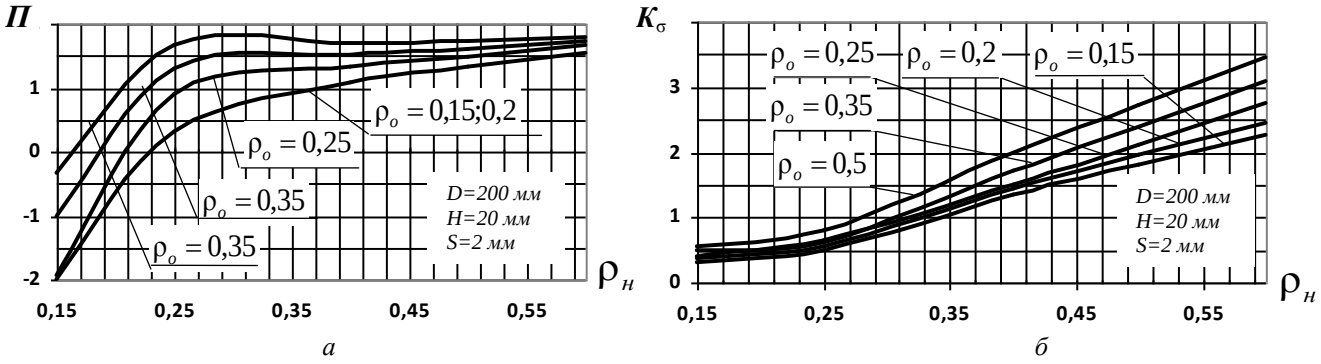
С учётом сказанного было осуществлено рассмотрение следующих диапазонов изменения значимых конструктивных параметров:

$$\rho_н = \frac{R_н}{H} \in [0{,}15;\ 0{,}6];\ \rho_o = \frac{R_O}{H} \in [0{,}15;\ 0{,}5];$$

$$\zeta = \frac{z}{H} \in [-0{,}2;\ 0{,}25], \qquad (6)$$

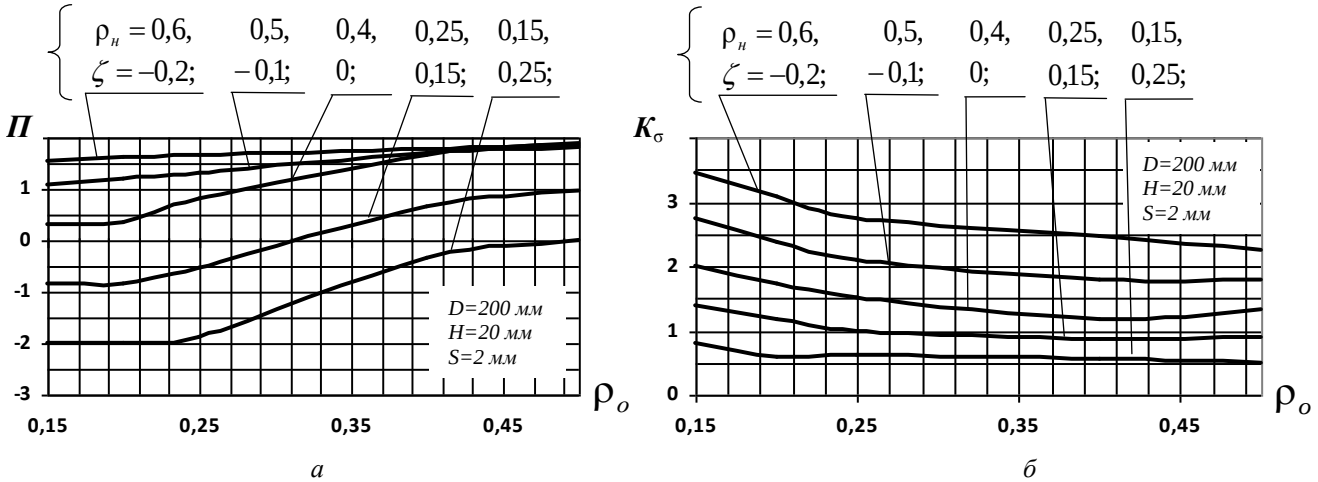
где z – расстояние от точки наблюдения до срединной поверхности исходной круглой пластины, взятое со знаком «минус» в случае, если точка наблюдения расположена ниже срединной поверхности (ближе к поверхности опирания, рис. 1), и со знаком «плюс» в случае расположения точки наблюдения выше срединной поверхности.

Рассмотрение диапазона изменения (6) позволило выявить такие конструктивные варианты плоскоцилиндрических образцов, характеристики НДС которых (коэффициенты $П$ и K_σ) одновременно удовлетворяют неравенствам (4). Соответствующие результаты вычислительных экспериментов в диапазоне изменения конструктивных параметров (6) представлены на рис. 7–9. Эти результаты в совокупности с описанными выше позволяют сделать следующие **выводы**:



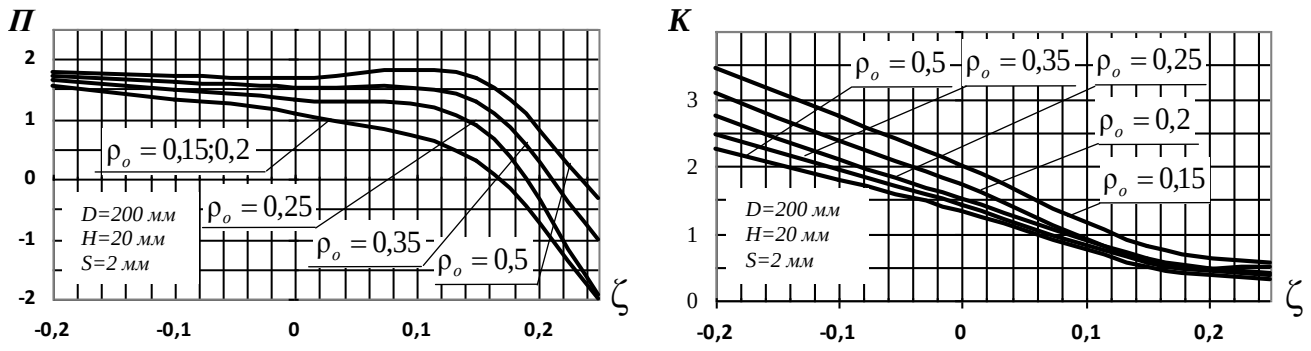
а *б*

Рис. 7. Зависимость коэффициента жесткости $П$ и концентрации эквивалентных напряжений K_σ от радиуса канавки на стороне нагружения



а *б*

Рис. 8. Зависимость коэффициента жесткости $П$ и концентрации эквивалентных напряжений K_σ от радиуса канавки на стороне опирания



а *б*

Рис. 9. Зависимость коэффициента жесткости *П* и концентрации эквивалентных напряжений K_σ от расположения точки наблюдения относительно нейтральной поверхности

1. Рассматриваемые образцы с концентраторами напряжений в виде U-образных канавок позволяют моделировать в процессе их испытаний напряжённое состояние, вид которого достаточно мягкий, величина коэффициента жёсткости *П* принимает значение близкое к *П* = –2, а коэффициент концентрации эквивалентных напряжений может изменяться при этом от единицы до трёх и выше в зависимости от выбранных значений ширины и глубины канавок.

2. Увеличение ширины канавки на стороне нагружения при неизменных значениях других параметров вызывает смягчение напряжённого состояния в точке наблюдения рабочей зоны образца, причем для случая минимальной ширины канавки на стороне опирания это смягчение более выражено.

3. Уменьшение толщины перемычки в рабочей зоне при неизменных значениях других конструктивных параметров образца приводит к смягчению вида его НДС в точке наблюдения.

4. Смещение при выборе размеров рассматриваемого образца перемычки к поверхности нагружения при постоянной толщине перемычки и минимальной ширине канавки на стороне опирания приводит к выраженному смягчению вида напряжённого состояния в точке наблюдения, меняя при этом знак коэффициента *П* с положительного на отрицательный по мере смещения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М. : Машиностроение. – 1985. – 224 с.
2. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы. – Л. : Машиностроение. – 1968. – 272 с.
3. Цвик Л. Б., Пимштейн П. Г, Борсук Е. Г. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния многослойного цилиндра с монолитным вводом // Проблемы прочности. – 1978. – № 4. – С. 74–77.
4. Цвик Л. Б., Щеглов Б. А., Федотова С. И. и др. Укрепление отверстий и статическая прочность осесимметричных штуцерных узлов. – Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1993, № 1. – С. 58–65.
5. Цвик Л. Б., Шапова М. В., Храменок М. А. Напряженное состояние и усталостная прочность осесимметричных патрубковых зон сосудов высокого давления // Вестн. машиностроения. – 2010. – № 2. – С. 18–24.
6. Цвик Л. Б. Образец для механических испытаний конструкционных сталей в условиях циклического нагружения // Проблемы путевого хозяйства Восточной Сибири : сб. науч. тр. / под ред. В. А. Покацкого. – Иркутск : ИрГУПС, 2005. – Вып. 3. – С. 200–203.
7. Цвик Л. Б., Пыхалов А. А., Храменок М. А. Образец для оценки прочности материала при сложном напряженном состоянии // Патент России № 2360227. 2009 г. Бюл. № 18.
8. Зеньков Е. В., Цвик Л. Б., Пыхалов А. А. Дискретное моделирование напряжённо-деформированного состояния плоскоцилиндрических образцов с концентраторами напряжений в виде канавок // Вестн. ИрГТУ. – 2011. – № 7(54). – С. 23–31.
9. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иоселевич Г. Б. Расчёт на прочность деталей машин. – М. : Машиностроение, 1979. – 700 с.
10. Кузнецов А. М., Лившиц В. И., Татаринов В. Г. Сосуды и трубопроводы высокого давления : справочник. – 2-е изд., доп. – Иркутск : Иркут. обл. тип. № 1, 1999. – 600 с.

УДК 004.932.2

Шигаров Алексей Олегович,
научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
тел.: 8 (3952) 45-31-02, e-mail: shigarov@icc.ru
Фёдоров Роман Константинович
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН
тел.: 8 (3952) 45-31-08, e-mail: fedorov@icc.ru

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ ПУСТОГО МЕСТА НА СТРАНИЦЕ ДОКУМЕНТА

A.O. Shigarov, R.K. Fedorov

AN ALGORITHM FOR DETECTION OF WHITESPACE ON DOCUMENT PAGE

Аннотация. *В данной работе предлагается алгоритм обнаружения пустого места на странице документа, расположенного между фрагментами текста. Предлагаемый алгоритм может использоваться для анализа компоновки документов (сегментации страниц). В частности, он может использоваться для обнаружения колонок в таблицах и многоколонном тексте.*

Ключевые слова: *документ, анализ, алгоритм, распознавание, пустое место.*

Abstract. *In the paper an algorithm for detection of whitespace located between texts on a document page is proposed. The algorithm can be used for the document layout analysis (page segmentation). In particular, it can be used to column detection in tables and multi-column text.*

Keywords: *document, analysis, algorithm, recognition, whitespace.*

Введение

В настоящее время в мире накоплено большое количество документов [5]. Для автоматизации извлечения информации из документов разрабатываются системы анализа и распознавания документов (АРД) [6]. Важной задачей АРД является анализ компоновки (или сегментация) – разделение документа на части (например, колонки, рисунки, таблицы).

Для выделения страничных и табличных колонок можно использовать анализ пустого места (*whitespace*), т. е. места внутри документа, не занятого текстом. Колонки отделяются друг от друга вертикальными промежутками пустого места, как показано на рис. 1. В данной работе предлагается оригинальный алгоритм для обнаружения промежутков пустого места на странице документа. Предлагаемый алгоритм выполняет поиск проме-

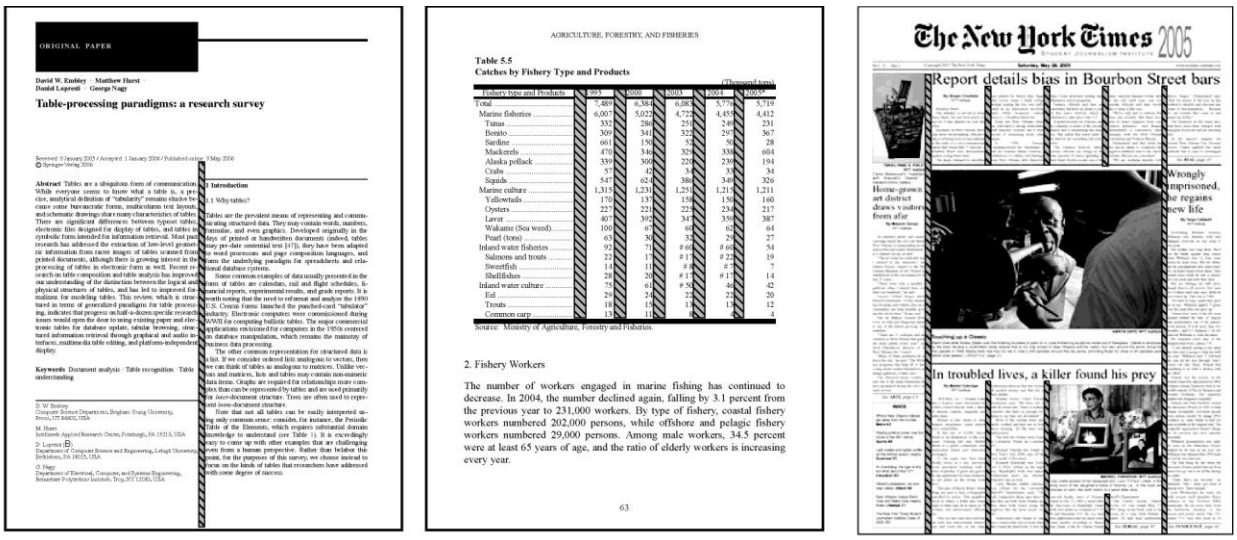


Рис. 1. Разделение колонок текста и табличных столбцов пустыми областями

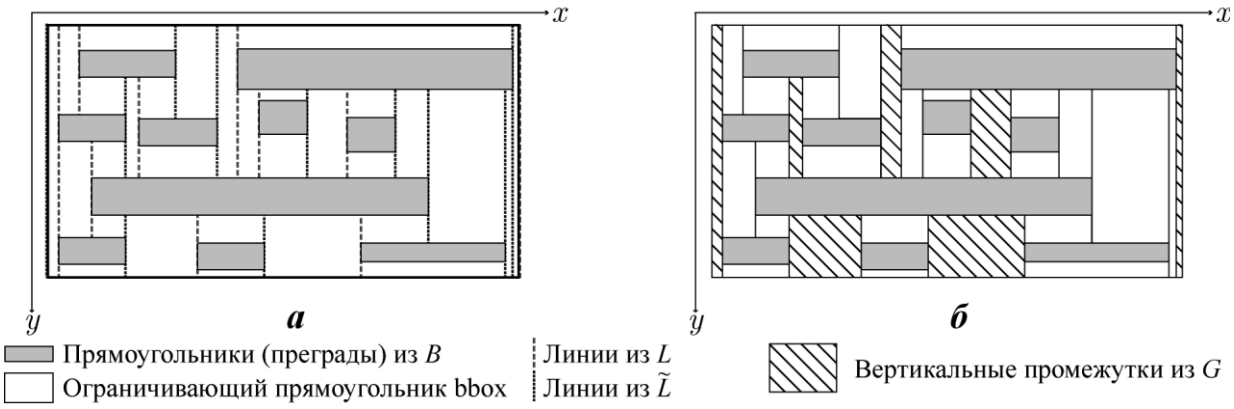


Рис. 2. Обнаружение пустых областей

жутков, расположенных вертикально, т. е. максимально вытянутых по вертикали. При этом если оси координат поменять местами, то он будет выполнять поиск промежутков, расположенных горизонтально, т. е. максимально вытянутых по горизонтали. Предлагаемый алгоритм является простым для реализации.

Различные подходы к анализу компоновки документа (сегментации страницы) рассматриваются в обзоре [3]. Решения описанной задачи разделения страниц и таблиц на колонки предлагается в работе [2]. В работе [2] кратко обсуждаются алгоритмы [1, 7], позволяющие выделять пустые места. Авторы [2] указывают, что эти алгоритмы являются сложными для реализации и не получили широкого распространения.

В работе [2] предлагается алгоритм поиска пустого места на странице документа в терминах задачи вычисления наибольшего пустого прямоугольника (largest empty rectangle problem) [4]. Входом этого алгоритма является ограничивающий прямоугольник, внутри которого располагаются преграды (прямоугольники, стороны которых параллельны соответствующим сторонам ограничивающего прямоугольника). Алгоритм выполняет поиск наибольшего пустого прямоугольника, который расположен внутри ограничивающего прямоугольника и не пересекается ни с одной преградой. Для обнаружения промежутков на странице выполняется поиск n лучших решений (пустых прямоугольников) по убыванию. При этом используется жадный алгоритм. После того как найден максимальный пустой прямоугольник, он рассматривается как преграда во время поиска последующих пустых прямоугольников.

Алгоритм обнаружения промежутков

В предлагаемом алгоритме используется прямоугольная система координат, в которой координата x возрастает слева направо, координата y возрастает сверху вниз (рис. 2). При описании этого алгоритма используется следующая нотация.

Прямоугольник, стороны которого параллельны соответствующим осям координат:

$$b = (x_l, y_t, x_r, y_b),$$

– задается координатами своих сторон: левой – $x_l = x_l(b)$, верхней – $y_t = y_t(b)$, правой – $x_r = x_r(b)$ и нижней – $y_b = y_b(b)$.

Вертикальная линия ортогональная оси абсцисс:

$$l = (x, y_t, y_b)$$

– задается тройкой координат: x-координатой – $x = x(l)$, верхней границей – $y_t = y_t(l)$, и нижней границей – $y_b = y_b(l)$.

Вход данного алгоритма состоит из 1) ограничивающего прямоугольника bbox, который, как правило, ограничивает страницу документа или некоторую её часть (например, таблицу), и 2) множества прямоугольников (преград) $B = \{b_1, \ldots, b_n\}, n \in \mathbb{N}$, которые, как правило, ограничивают некоторые блоки текста. При этом прямоугольники из множества B расположены внутри ограничивающего прямоугольника bbox, не пересекаясь с его границами, и не пересекаются между собой.

Предлагаемый алгоритм включает два этапа. На первом этапе для каждого прямоугольника $b : b \in B$, из его боковых сторон (левой и правой) протягиваются (продлеваются) соответственно две прямые линии (линейки) вверх и вниз до тех пор, пока они не упрутся в другой прямоугольник $b' : b' \in B,\ b' \neq b$, либо в верхнюю или нижнюю грань ограничивающего прямоугольника bbox, как показано на рис. 2, *а*. Линии, полученные при протягивании левых боковых сторон прямоугольников, составляют множество L. Линии, получен-

ные при протягивании правых боковых сторон прямоугольников, составляют множество $\tilde{L}$.

На втором этапе среди полученных линий выбираются пары линий $(\tilde{l}, l)$, где первая линия $\tilde{l}$ либо получена при протягивании правой боковой стороны прямоугольника из $B - \tilde{l} \in \tilde{L}$, либо является левой стороной ограничивающего прямоугольника bbox, а вторая линия l либо получена при протягивании левой боковой стороны прямоугольника из $B - l \in L$, либо является правой стороной ограничивающего прямоугольника bbox. При этом между линиями из такой пары $(\tilde{l}, l)$ не должно быть ни одного прямоугольника из множества B, а их верхние и нижние границы должны совпадать соответственно, т. е.

1) $\nexists b : b \in B$, $x(l_r) \le x_l(b)$ и $x_r(b) \le x(l_l)$ и $\left(y_t(l) < y_t(b) < y_b(l)\right.$ или $\left. y_t(l) < y_b(b) < y_b(l)\right)$,

2) $y_t(l) = y_t(\tilde{l})$ и $y_b(l) = y_b(\tilde{l})$.

Каждая пара таких линий (линеек) составляет отдельный промежуток, как показано на рис. 2 *б*. Множество всех полученных в результате промежутков является выходом данного алгоритма $G = \{g_1, \ldots, g_m\}, m \in \mathbb{N}$.

Предлагаемый алгоритм описан с помощью псевдокода на рис. 3 (этап 1) и рис. 4 (этап 2). Далее приводятся пояснения представленного псев-

Вход: bbox, $B = \{b_1, \ldots, b_n\}, n \in \mathbb{N}$. **Выход:** $G = \{g_1, \ldots, g_m\}, m \in \mathbb{N}$.

01 **создать** прямоугольник $b_0 \leftarrow \left(x_l(\text{bbox}), y_t(\text{bbox}), x_r(\text{bbox}), y_t(\text{bbox})\right)$

02 **создать** прямоугольник $b_{n+1} \leftarrow \left(x_l(\text{bbox}), y_b(\text{bbox}), x_r(\text{bbox}), y_b(\text{bbox})\right)$

03 **добавить** прямоугольники b_0, b_{n+1} в список *в*

04 $\text{SORT}\left(B, (y_t, x_l)\right)$

05 **for** $i = \overrightarrow{1, n}$ **do**

06 $\overline{y_l}, \overline{y_r}, \underline{y_l}, \underline{y_r} \leftarrow$ **null**

07 **for** $j = \overrightarrow{i-1, 0}$ **do**

08 **if** $y_t(b_i) > y_b(b_j)$ **then**

09 **if** $\overline{y_l} =$ **null и** $x_l(b_j) < x_l(b_i) < x_r(b_j)$ **then** $\overline{y_l} \leftarrow y_b(b_j)$

10 **if** $\overline{y_r} =$ **null и** $x_l(b_j) < x_r(b_i) < x_r(b_j)$ **then** $\overline{y_r} \leftarrow y_b(b_j)$

11 **if** $\overline{y_l}, \overline{y_r} \neq$ **null then выход** из цикла по *j*

12 **for** $j = \overrightarrow{i+1, n+1}$ **do**

13 **if** $y_b(b_i) < y_t(b_j)$ **then**

14 **if** $\underline{y_l} =$ **null и** $x_l(b_j) < x_l(b_i) < x_r(b_j)$ **then** $\underline{y_l} \leftarrow y_t(b_j)$

15 **if** $\underline{y_r} =$ **null и** $x_l(b_j) < x_r(b_i) < x_r(b_j)$ **then** $\underline{y_r} \leftarrow y_t(b_j)$

16 **if** $\underline{y_l}, \underline{y_r} \neq$ **null then выход** из цикла по *j*

17 **if** список L не содержит линию с координатами $\left(x_l(b_i), \overline{y_l}, \underline{y_l}\right)$ **then**

18 **создать** линию $l \leftarrow \left(x_l(b_i), \overline{y_l}, \underline{y_l}\right)$

19 **добавить** линию *l* в список L

20 **if** список $\tilde{L}$ не содержит линию с координатами $\left(x_r(b_i), \overline{y_r}, \underline{y_r}\right)$ **then**

21 **создать** линию $\tilde{l} \leftarrow \left(x_r(b_i), \overline{y_r}, \underline{y_r}\right)$

22 **добавить** линию $\tilde{l}$ в список $\tilde{L}$

Рис. 3. Псевдокод алгоритма обнаружения промежутков пустого места, этап 1

23 **создать** линию $\tilde{l} \leftarrow \left(x_l(\text{bbox}), y_t(\text{bbox}), y_b(\text{bbox})\right)$
24 **создать** линию $l \leftarrow \left(x_r(\text{bbox}), y_t(\text{bbox}), y_b(\text{bbox})\right)$
25 **добавить** линию $\tilde{l}$ в список $\tilde{L}$
26 **добавить** линию l в список L
27 $\text{SORT}\left(L,(x,y_t)\right)$
28 $\text{SORT}\left(\tilde{L},(x,y_t)\right)$
29 **for** $i=\overrightarrow{1,s+1}$ **do**
30 **for** $j=\overrightarrow{1,p+1}$ **do**
31 **if** $x(\tilde{l}_i)<x(l_j)$ **и** $\overline{y}(\tilde{l}_i)=\overline{y}(l_j)$ **и** $\underline{y}(\tilde{l}_i)=\underline{y}(l_j)$ **then**
32 **создать** промежуток $g \leftarrow \left(x(\tilde{l}_i), \overline{y}(\tilde{l}_i), x(l_j)\underline{y}(l_j)\right)$
33 **добавить** промежуток g в список G
34 **выход** из цикла по j

Рис. 4. Псевдокод алгоритма обнаружения промежутков пустого места, этап 2

докода. Для простоты предполагается, что множества представлены в виде списков. В данном алгоритме функция $\text{SORT}\left(S,(c_1,c_2)\right)$ упорядочивает элементы (линии, прямоугольники) списка S лексикографически по возрастанию их (c_1,c_2)–координат, т. е. $\forall s,\tilde{s}: s,\tilde{s}\in S$ выполняется условие $s<\tilde{s}$, если либо $c_1(s)<c_1(\tilde{s})$, либо $c_1(s)=c_1(\tilde{s})$ и $c_2(s)<c_2(\tilde{s})$. Формируются два прямоугольника. Один соответствует верхней грани ограничивающего прямоугольника (строка 01), а другой – его нижней грани (строка 02). Прямоугольники b_0 и b_{n+1} добавляются в список B (строка 03). Прямоугольники в списке B упорядочиваются лексикографически по возрастанию их (y_t,x_l)– координат сверху вниз слева направо (строка 04). Перебираются прямоугольники из B сверху вниз слева направо (строки 05–22). Перебираются прямоугольники из B справа налево снизу вверх (линии из боковых сторон текущего прямоугольника протягиваются вверх) (строки 07–11). Перебираются прямоугольники из B сверху вниз слева направо (линии из боковых сторон текущего прямоугольника протягиваются вниз) (строки 12–16). Если в результате выполнения этапа 1 получены следующие непустые множества линий:

$$L=\left\{l_1,...,l_p\right\}, \tilde{L}=\left\{\tilde{l}_1,...,\tilde{l}_s\right\},\ p,s\in\mathbb{N},$$

тогда выполняется второй этап.

На этапе 2 формируются две линии. Одна линия $\tilde{l}$ соответствует левой стороне ограничивающего прямоугольника (строка 23), а другая линия l – его правой стороне (строка 24). Линия $\tilde{l}$ добавляется в список $\tilde{L}$ (строка 25), а l – в список L (строка 26). Линии в списках L и $\tilde{L}$ упорядочиваются лексикографически по возрастанию своих (x,y_t)–координат слева направо сверху вниз (строки 27–28). Перебираются линии из списка $\tilde{L}$ слева направо сверху вниз (строки 29–34). Перебираются линии из списка L слева направо сверху вниз (строки 30–34).

Вычислительная сложность данного алгоритма равна $O(n^2)$.

Заключение. Предлагаемый алгоритм может использоваться в задачах сегментации таблиц на отдельные столбцы, в частности в методе, предлагаемом в работах [8, 9]. Кроме того, этот алгоритм может использоваться для сегментации страниц, в частности для выделения колонок в многоколонных текстах. При этом предлагаемый алгоритм является достаточно простым для реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Baird H. S., Jones S. E., Fortune S. J. Image Segmentation by Shape-Directed Covers // In Proc. Int. Conf on Pattern Recognition. – USA. – 1990. – Vol. 1. – P. 820–825.
2. Breuel T. M. Two Geometric Algorithms for Layout Analysis // Lecture Notes in Computer Science : In Proc. of the 5th Int. Workshop on Document Analysis Systems. – Vol. 2423. P.

188−199.
3. Cattoni R., Coianiz T., Messelodi S., Modena C. M. Geometric layout Analysis Techniques for Document Image Understanding : a Review // Technical report. IRST. Trento. – Italy. – 1998. – P. 68
4. Chaudhuri J., Nandy S. C., Das S., Largest Empty Rectangle Among a Point Set // Journal of Algorithms. – 2003. – Vol. 46. – Issue 1. – P. 54–78.
5. Lyman P., Varian H. R. How Much Information? // Technical Report. 2003. – URL : http://www.sims.berkeley.edu/ how-much-info-2003.
6. Machine Learning in Document Analysis and Recognition / Eds. : Marinai S., Fujisawa H. // Series: Studies in Computational Intelligence. – 2008. – Vol. 90. P. – 434.
7. Orlowski M. A New Algorithm for the Largest Empty Rectangle Problem // Algorithmica. – 1990. – Vol. 5, No. 1–4. – P. 65–73.
8. Shigarov A. O., Bychkov I. V., Ruzhnikov G. M., Khmel'nov A. E. A Method for Table Detection in Metafiles // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2009. – Vol. 19, No 4. – P. 693–697.
9. Бычков И. В., Ружников Г. М., Хмельнов А. Е., Шигаров А. О. Эвристический метод обнаружения таблиц в разноформатных документах // Вычислительные технологии. – 2009. – Т. 14. – № 2. – С. 58–73.

УДК 621.7, 532.5

Курносов Николай Ефимович,
д-р техн. наук, профессор, зав. каф. «Транспортно-технологические машины и оборудование», Пензенский государственный университет, тел.: (8412) 36-80-71, e-mail: ttmo-pgu@mail.ru
Лебединский Константин Валерьевич,
аспирант, вед. инженер каф. «Транспортно-технологические машины и оборудование», Пензенский государственный университет, тел.: (8412) 36-80-71, e-mail: Lebedinskiy_K@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКАХ ЖИДКОСТИ

N.E. Kurnosov, K.V. Lebedinsky

COMPUTER SIMULATION OF CAVITATIONAL PROCESS IN THE TWIRLED STREAMS OF THE FLUID

Аннотация. *Рассмотрена модель закрученного течения жидкости и образования в потоке зоны пониженного давления. Определены режимы, минимизирующие необходимые энергозатраты для возникновения кавитации. Выполнена экспериментальная проверка адекватности полученных моделей, изложены рекомендации по использованию результатов исследования.*

Ключевые слова: *закрученный поток, кавитация, вихревое устройство.*

Abstract. *The model of the twirled current of a fluid and formation in a stream of a lowered pressure zone is considered. Conditions minimizing necessary power inputs for origin of a cavitation are certain. Experimental inspection of adequacy of the received models is executed, recommendations on use of results of research are stated.*

Keywords: *twirled stream, cavitation, vortical device.*

В настоящее время эффекты гидродинамической кавитации широко используются для разработки новых технологических процессов и повышения эффективности работы существующего оборудования в области физико-химической интенсификации различных технологических процессов. Анализ работ, связанных с возникновением и развитием гидродинамической кавитации в жидкостях, показывает недостаточность данных по теории возникновения кавитации в закрученных потоках жидкости. Отсутствуют также работы по моделированию процесса гидродинамической кавитации, позволяющие выявить закономерности и сформировать рекомендации по минимизации энергозатрат на образование кавитационной зоны в потоке жидкости. Практически не изучена гидродинамическая кавитация в целой группе кавитационных устройств, использующих закрученное или вихревое течение жидкости. [1–5] Согласно экспериментальным исследованиям [6], режим кавитации в различных гидрокавитационных устройствах наблюдается при организации течения жидкости с соответствующей скоростью при давлении от 0,5 МПа.

В связи с этим возникает необходимость продолжения работ в области моделирования кавитационных процессов в жидких средах при их закрученном течении. Работа по исследованию

кавитационного процесса при закрученном течении жидкости расширяет видение общей картины кавитации в жидких средах и жидкостно-газовых потоках, что может послужить базой для разработки новых энергоэффективных технологий и устройств.

Цель настоящей работы заключалась в разработке рекомендаций по минимизации энергозатрат для обеспечения кавитационного процесса в закрученных потоках жидкости.

В процессе исследований проведено компьютерное моделирование течения закрученного потока жидкости и выявлены условия возникновения кавитационной зоны; определены режимы возникновения кавитации с минимальными энергозатратами; проведено экспериментальное исследование образования кавитационной зоны при закрученном течении жидкости на физических образцах с целью оценки адекватности полученных компьютерных моделей.

При исследовании использовалось компьютерное моделирование в модуле FlowSimulation программного продукта SolidWorks. Экспериментальная проверка адекватности полученных результатов осуществлялась на физическом образце кавитационного устройства, размещенном на испытательном стенде.

Компьютерная модель вихревого кавитационного устройства показана на рис. 1. Описание граничных условий приведено в табл. 1.

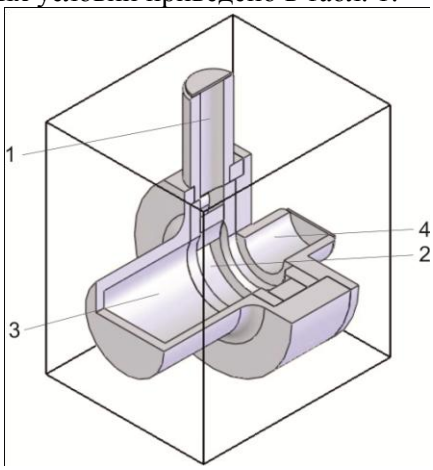


Рис. 1. Компьютерная модель вихревого кавитационного устройства: 1 – штуцер, 2 – улитка, 3 – корпус, 4 - крышка

При изменении граничных условий (скорость и давление в потоке), в частности входного расхода и давления жидкости, выявлялись условия образования зоны пониженного давления. Кавитация в жидкости происходит при условии падения давления ниже давления насыщенных паров при данной температуре $\frac{p-p_v}{0,5\rho\upsilon^2}\le 1$ [7], где p – давление в потоке жидкости, p_v – давление насыщенных паров, ρ – плотность жидкости, υ – скорость потока.

Таблица 1

Граничные условия

№ п/п	Наименование граничной области	Обозначение граничной области	Тип граничных условий	Описание граничной области	Задаваемые значения
1	Входное отверстие	In	Inlet (вход)	Поверхность отверстия штуцера	Inlet Mass Flow – 0,845 кг/с
2	Выходное отверстие	Out	Opening (открытая граница)	Поверхность отверстия в крышке	Pressure – 0,1 МПа
3	Остальная граница	Default	Real Wall (стенка)	Внутренняя поверхность (камера)	

Учитывая, что при моделировании использовалась вода при температуре 20 ˚С, начало кавитационного процесса должно происходить при достижении давления в потоке жидкости ниже значения 2,34 кПа [8]. Достижение данного показателя наблюдалось при подаче жидкости в вихревое устройство [9] под избыточным давлением 0,45 МПа.

С целью снижения требуемого входного давления проведено моделирование при варьировании различных геометрических параметров вихревого устройства, в частности диаметра входного отверстия, типа завихрителя жидкости, длины вихревой камеры, диаметра и длины выходного отверстия.

Проведенное исследование позволило выявить закономерности течения потока жидкости при изменении геометрических параметров устройства и граничных условий. Установлено, что при закручивании потока жидкости существенно снижается требуемое входное давление, необходимое для достижения кавитации. Обнаружено и доказано, что для большего снижения входного давления требуется определенная организация закрученного течения жидкости.

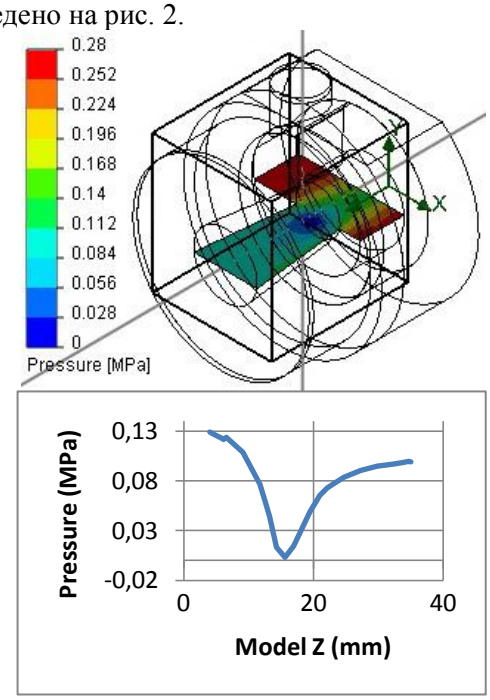
На основе исследований разработаны рекомендации для реализации в конструктивно-техническом исполнении устройства. При закрученном течении жидкости для получения зоны кавитации с минимальными энергозатратами необходимо:

1. Подачу жидкости осуществлять по траектории наименьшего динамического сопротивления (эффективно может использоваться закручивание по спирали Архимеда), проходное сечение нагнетательного патрубка и самой узкой части улиточ-

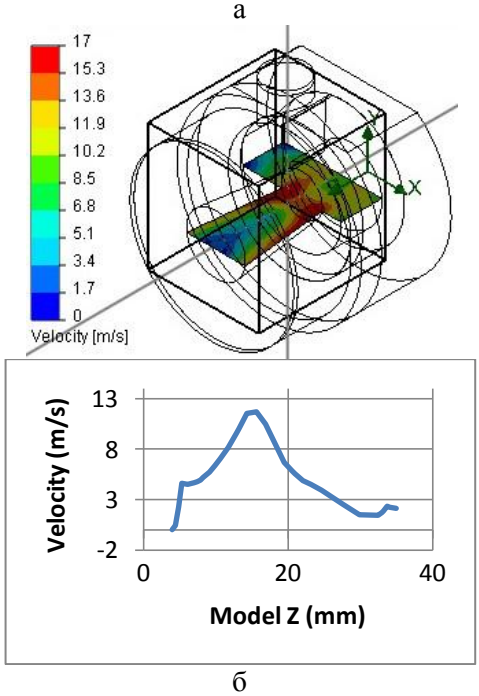
ного ввода необходимо выполнять равной по площади.

2. Осуществлять одностороннее течение жидкости по сечению устройства, для этого создать истечение жидкости из улитки в одном направлении без дополнительной камеры разворота потока.

С использованием выявленных закономерностей изменена конструкция компьютерной модели вихревого устройства и получены количественные оценки. Распределение скоростей (а) и давлений (б) по продольному сечению устройства приведено на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Распределение скоростей (а) и давлений (б) по продольному сечению устройства

Распределение скоростей и давлений по объему потока в устройстве представлено на рис. 3.

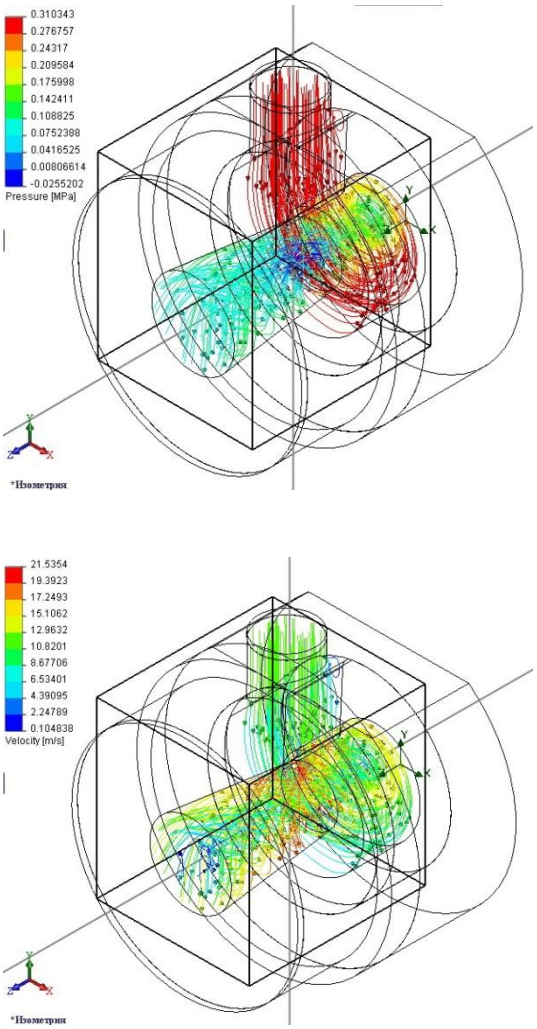


Рис. 3. Распределение скоростей и давлений по объему потока

В полученной оптимизированной компьютерной модели устройства удалось снизить энергозатраты – требуемое входное давление уменьшилось с 0,45 МПа до 0,28 МПа, при достижении тех же условий возникновения кавитации.

Закономерности кавитационного процесса в закрученном потоке жидкости также были определены для типоразмерной группы вихревых устройств с проходным сечением от 10 до 100 мм.

Для проверки адекватности полученных моделей было изготовлено вихревое устройство (рис. 4), полностью соответствующее геометрическим параметрам компьютерной модели, и экспериментальный стенд (рис. 5).

Рис. 4. Вихревое устройство

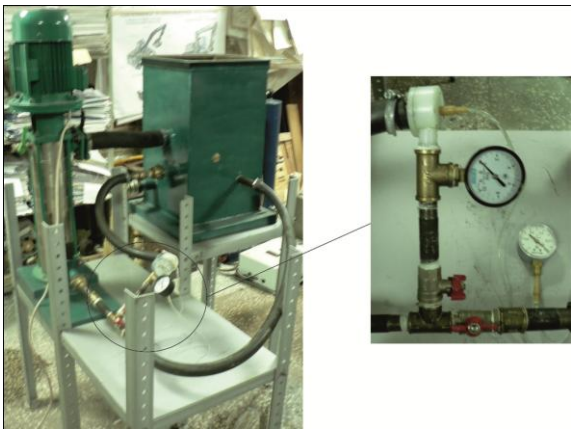


Рис. 5. Экспериментальный стенд

Экспериментальная оценка проводилась с помощью замера давления жидкости на входе в устройство и создаваемого вакуума, замеряемого в специальном технологическом отверстии. Практические данные сравнивались с данными, полученными при компьютерном моделировании. Результаты сравнения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные данные

Входящее давление, МПа	Эжекция, МПа	
	Моделирование	Эксперимент
0,05	0.0005	0,000
0,1	0,0041	0,0042
0,15	0,0081	0,0088
0,2	0,0130	0,0132
0,25	0,0164	0,0166
0,3	0,0215	0,0212
0,35	0,0256	0,0254
0,4	0,0311	0,0320
0,45	0,0365	0,0366
0,5	0,0429	0,0424
0,55	0,0473	0,0472
0,6	0,0536	0,0534

Подсчитанные погрешности измерений позволяют прогнозировать доверительную вероятность при уровне значимости 0,05, в связи с чем подобные модели и полученные закономерности достоверно могут быть использованы при разработке технологий и устройств кавитационного действия.

Полученные результаты легли в основу разработки более энергоэффективных кавитационных устройств для нагрева жидкостей. Использование полученных данных при проектировании теплотехнических устройств гидрокавитационного действия позволило получить снижение общей металлоемкости устройства на 60 % и прирост тепловой энергии на 15 %. Данные устройства апробированы на ряде машиностроительных предприятий не только России, но и зарубежья. Полученные результаты показывают значительную экономическую целесообразность разработки.

Анализ использования кавитационных устройств в различных отраслях показал, что можно существенно повысить эффективность работы оборудования для очистки деталей машиностроительной продукции за счет использования устройств кавитационной интенсификации процесса.

Внедрение кавитационного устройства на операцию очистки алюминиевых деталей на одном производственном предприятии Пензенской области позволило снизить энергетические затраты и экономию химических моющих средств более чем на 20 % при незначительных капитальных вложениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестн. ТГТУ. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861–869.
2. Young F. R. Cavitation. – London, U. K. : Imperial Collage Press, 1999. – 418 p.
3. Ламекин Н. С. Кавитация: теория и применение / Н. С. Ламекин. – М. : Русаки, 2000. – 248 с.
4. Franc J. P., Michel J. M. Fundamentals of Cavitation // Springer. – New York, 2004. – 300 p.
5. Гулый И. С., Федоткин И. М., Боровский В. В. Кавитация. Интенсификация процессов смешения и диспергирования гидродинамической кавитацией. – Киев : Арктур-А, 1998. – 128 с.
6. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Ч. II. – Киев : ОКО, 2000. – 898 с.
7. Козырев С. П. Гидроабразивный износ метал-

лов при кавитации. – М. : Машиностроение, 1964. – 140 с.
8. Физический энциклопедический словарь. М. : Сов. Энциклопедия, 1960. – Т. 1. Давление насыщенного пара.
9. European Patent Application EP № 1 808 651 A2, F24J 3/00. Cavitation Thermogenerator and Method for Heat Generation by the Cavitation Thermormogenerator /Applicant Vortexco Tecnologies Limited P. C 1095, Nicosia (CY); Representative Adorno, Silvano et al Societa Italiana Brevetti S. p. A., Via Carducci 8 20123 Milano. MI (IT), Priority 17.01.2006.

УДК 622.23.05:681.523

Ереско Татьяна Тимофеевна,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой ОКМ Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева
Тубольцев Анатолий Анатольевич,
аспирант, Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева
Ереско Сергей Павлович,
д-р техн. наук, профессор кафедры «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» Сибирского федерального университета им. академика М.Ф. Решетнева
сот. +7 913-509-3766, дом. (391)246-22-88.
Ереско Владимир Сергеевич,
аспирант, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОПНЕВМОУДАРНЫХ АГРЕГАТОВ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

T.T. Eresko, A.A. Tubolcev, S.P. Eresko, V.S. Eresko

HYDROPNEUMOBLOW AGGREGATES CONSTRUCTION IMPROVEMENT BASED ON IMITATING MODELLING

Аннотация. *Приводится описание конструкции, принципа действия и методики имитационного математического моделирования гидропневмоударного агрегата с учетом перемещения его корпуса под действием внешних и внутренних возмущающих усилий. Разработанная математическая модель позволяет определить кинематические, динамические, энергетические характеристики гидропневмоударного агрегата при различных значениях структурных параметров с оценкой устойчивости функционирования, обеспечивая минимум ограничений динамических состояний его элементов.*

Ключевые слова: *гидропневмоударный агрегат, математическая модель, гидросистема, жидкость, клапан, поршень-боек, рабочий цикл, ударная мощность.*

Abstract. *Description of construction, action principle and imitating methodic of mathematic modeling of hydropneumoblow aggregate subject to movement it's case under effect outer and inner perturbation loads is presented. The mathematical model which provides to determine kinematic, dynamic and energy characteristics of hydropneumoblow aggregate with various values of structure parameters with stability estimation of functioning, supports minimum of limitations of dynamic conditions of its elements is designed.*

Keywords: *hydropneumoblow aggregate, mathematic model, hydrosystem, fluid, valve, piston-pane, operating cycle, percussion powerfulness.*

Описание конструкции и принципа действия гидропневмоударного агрегата

Гидропневмоударный агрегат состоит из корпуса 1 с радиальными и осевыми каналами, бойка 3 с цилиндрическими поясками 4 и 5, клапана

7 и инструмента 18. Боек и корпус образуют полости взвода 2, слива 10 и пневмоаккумулятора 11.

В начале работы боек 3 и клапан 7 находятся в крайних левых по рисунку (рис. 1) положениях.

От насосной станции жидкость подается в рабочую полость 6 и в полость взвода 2, воздействуя на левый торец 17 бойка 3. Боек начинает двигаться вверх, сжимая газ в пневмоаккумулято-

ре 11. При этом клапан 7 за счет разности площадей ступеней большей 19 и меньшей 20 удерживается в сопряжении с седлом 15, отсекая рабочую полость 6 от полости слива 10 и перекрывая осевой канал 8, соединяющий рабочую полость 6 с полостью слива 10.

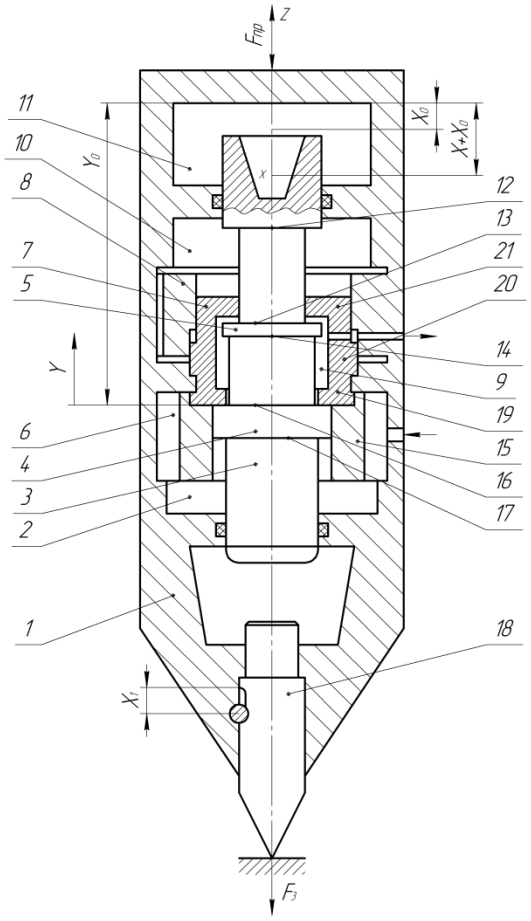


Рис. 1. Гидропневмоударный агрегат

При взаимодействии верхнего торца поршня 16 со ступенью 19 клапана 7 последний перемещается вправо, снимается с седла 15 и далее давлением жидкости рабочей полости 6 перебрасывается в крайнее верхнее положение, соединяя рабочую полость 6 с полостью 10 через осевой канал 8, и перекрывает сливные отверстия. Жидкость из гидросистемы через рабочую полость 6 и осевой канал 8 поступает в полость 10 и за счет давления газа пневмоаккумулятора 11 и разности площадей ступеней 3 и 12 перемещает боек 3 вниз, осуществляя рабочий ход.

Перед нанесением удара по инструменту 18 боек 3 цилиндрическим пояском 5 сопрягается со ступенью 19 клапана 7, отсекая рабочую полость 6 от полости 9, и выступом 12 сопрягается со ступенью 21 клапана 7, отсекая полость слива 10 от полости 9.

Жидкость поступает в полость 10 через канал 8, воздействует на активную площадь клапана 7, перемещает его в начальное, т. е. крайнее нижнее по рисунку, положение. Клапан сопрягается с седлом 15, перекрывает осевой канал 8 и открывает сливные отверстия. Затем цикл повторяется.

Имитационное математическое моделирование гидропневмоударного агрегата

Математическая модель предназначена для решения задач устойчивого функционирования ударного устройства, оценки вибрационно-силовых характеристик и влияния конструктивных параметров и зазоров в сопряжениях на выходные параметры.

При составлении уравнений были приняты следующие допущения: сжатие и расширение газа подчиняются политропическому процессу; подача насоса, питающего гидросистему, постоянна; сила вязкого трения пропорциональна скорости; сливные отверстия имеют прямоугольную форму; тепловой режим установившийся; гидродинамическими силами пренебрегаем; перетечки между полостями по зазорам в сопряжениях пропорциональны соответствующим перепадам давлений, т. е. течение жидкости в зазорах ламинарное; сопрягаемые поверхности строго цилиндрический формы; щели в сопряжениях параллельны и не изменяются под действием давлений; потерями давлений на участках цилиндрических поясков в полости слива пренебрегаем.

Особенностью данной математической модели является рассмотрение движения корпуса под действием внешних и внутренних возмущающих усилий. Внешние возмущения учитывают воздействие навески базовой машины и особенности взаимодействия инструмента с обрабатываемой средой.

Механическое перемещение подвижных масс описывается дифференциальными уравнениями движения, составленными в соответствии с принципом Даламбера для несвободной механической системы. Уравнения расходов составлены с учетом неразрывности потока жидкости и ввиду резко выраженной динамичности рабочего процесса исследуемого механизма учитывают сжимаемость жидкости и упругость элементов гидропривода.

Уравнения движения поршня-бойка и корпуса записываются в следующем виде:

$$m_б\ddot{x} = P_A S_б + P_{Сл}S_{Сл} - P_{Вз}S_{Вз} - F_Ж - \\ -(F_{ТР.М} - F_{ТР.С})sign\dot{x} - F_З + m_б g / \sin\beta; \quad (1)$$

$$m_K\ddot{z} = P_A S_K + P_{Сл}S_{Сл} - P_{Вз}S_{Вз} - F_Ж - \\ -(F_{ТР.М} - F_{ТР.С})sign\dot{z} + F_З - F_{пр} - m_K g / \sin\beta. \quad (2)$$

Текущее давление газа в пневмоаккумулято-

ре Ра определяется из уравнения политропы:

$$PV^n = const,$$

где P – давление газа, Па; V – объем газа, м^3; n – показатель политропы.

Выразим текущее давление P_A в пневмоаккумуляторе через начальные значения объема V_1 и давления P_1 :

$$P_A = P_1 \cdot V_1^n / V_A^n,$$

где V_A – текущий объем газа в пневмоаккумуляторе, м^3.

Вводя для описания перемещения поршня-бойка и корпуса координаты x и z, положительные направления которых соответствуют движению подвижных масс под действием газа пневмоаккумулятора, можно записать:

$$P_A P_1 = \frac{(x_0 S_\delta)^n}{(xS_\delta + zS_K)^n} = P_1 \left(\frac{x_0}{x+z} \right)^n, \qquad (3)$$

так как в данной конструкции $S_\delta = S_K$.

Сила трения манжетных уплотнений

$$F_{\text{ТР.М}} = \pi \cdot d \cdot h \cdot \mu \cdot n_1 \cdot P,$$

где d – диаметр в уплотняемом месте, м; h – высота активной части, м; μ – коэффициент трения; n_1 – количество манжетных уплотнений; P – давление рабочей среды на уплотнение, Па.

Сила трения металлических поясков о стенки корпуса

$$F_{\text{ТР.П}} = K_{\text{И}} \cdot l \cdot D \cdot f \cdot P,$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент, зависящий от точности изготовления; l – длина пояска, м; D – диаметр пояска, м; P – давление на входе, Па.

Сила вязкого трения:

$$F_{Ж} = \nu\rho \frac{S}{\Delta} \vartheta = \alpha\vartheta,$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, сСт; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; S – площадь щели, м^3; Δ – радиальный зазор, м; υ – скорость движения, м/с; α – коэффициент силы вязкого трения, Н·с/м.

Для цилиндрических поясков площадь S щели определяется как, м^2

$$S = \pi \cdot D \cdot l.$$

Сила F_3 в общем случае является функцией свойств обрабатываемой среды, параметров инструмента и действует на корпус и поршень-боек в период их контакта с инструментом. Для твердых покрытий и горных пород F_3 равна, Н

$$F_3 = C \cdot X, \qquad (4)$$

где C – динамическая жесткость, Н/м; X – текущее значение пути внедрения, м.

Учитывая (3)–(4) и особенности расчетной схемы, (1) и (2) примут следующий вид:

$$m_\delta \ddot{x} = \left\{ P_1 S_\delta \left(\frac{x_0}{x+z} \right)^n \left(1 - \frac{4n_1 \cdot \mu \cdot h}{d_{12}} sign\dot{x} \right) + \right.$$

$$+ P_{\text{Сл}} S_{\text{Сл}} \left(1 - \frac{4\ \pi \cdot d_{12} \cdot \mu \cdot h \cdot n_1 + K_{\text{И}} \cdot d_4 \cdot l_4 \cdot f}{\pi\ d_4{}^2 - d_{12}{}^2} \cdot sig\dot{x} \right) -$$

$$- P_{\text{Вз}} S_{\text{Вз}} \left(1 + \frac{4\ \pi \cdot d_3 \cdot \mu \cdot h \cdot n_1 + K_u \cdot d_4 \cdot l_4 \cdot f}{\pi\ d_4{}^2 - d_3{}^2} \cdot \right.$$

$$\left. \cdot sign\dot{x} - \alpha\ \dot{x} + \dot{z}\ - K_{\text{И}} F_3 - \frac{m_\delta g}{\sin\beta} \right\} K_1;$$

$$K_1 = \begin{cases} 0, при\ P_A S_\delta > P_B S_B, \dot{x} \le 0; \\ 1; \end{cases}$$

$$K_4 = \begin{cases} 1,\ при\ x \ge x_0 + x_P, \dot{x} > 0; \\ 0,\ при\ \dot{x} < 0. \end{cases}$$

$$m_K \ddot{z} = P_1 S_K \left(1 - \frac{4n_1 \cdot \mu \cdot h}{d_{12}} sign\dot{z} \right) + P_{\text{Сл}} S_{\text{Сл}}\ 1 -$$

$$- \frac{4\ \pi \cdot d_{12} \cdot \mu \cdot h \cdot n_1 + K_{\text{И}} \cdot d_4 \cdot l_4 \cdot f}{\pi\ d_4^2 - d_{12}^2} sign\dot{z} \Bigg) -$$

$$- P_{\text{Вз}} S_{\text{Вз}} \left(1 - \frac{4\ \pi \cdot d_3 \cdot \mu \cdot h \cdot n_1 + K_{\text{И}} \cdot d_4 \cdot l_4 \cdot f}{\pi\ d_4^2 - d_3^2} sign\dot{z} \right) -$$

$$- \alpha\ \dot{x} + \dot{z}\ + \frac{m_K g}{\sin\beta} + K_5 F_3 - F_{\text{пр}},$$

$$K_5 = \begin{cases} 0,\ при\ F_{\text{пр}} - Cz \le 0; \\ 0,\ при\ \dot{x} > 0, x \ge x_0 + x_P, \delta > x_0 + x_P + x_{\text{вн}}; \\ 1, при\ \delta \le x_0 + x_P + x_{\text{вн}}. \end{cases}$$

$$m_K \ddot{y} = P_{\text{Вз}} S_{\text{Уп}} - P_{\text{Вз}} S_1 + P_{\text{Сл}} S_2 - P_{\text{Сл}} S_3 - F_{\text{ТР.П}} sign\dot{y} - F_{Ж};$$

$$m_3 \ddot{y} = \ P_{\text{Вз}}\ S_{\text{УП}} - S_1\ + P_{\text{Сл}}\ S_2 - S_3\ -$$

$$- K_{\text{И}} l_{20} d_{20}\, f P_{\text{Вз}} sign\dot{y} + K_{\text{И}} l_{21} d_{21}\, f P_{\text{Сл}} sign\dot{y} - \qquad (5)$$

$$- \alpha\ \dot{y} + \dot{z}\ \ K_3.$$

С учетом сил, действующих на клапан управления, и принятых допущений уравнение движения клапана имеет вид

$$K_3 = \begin{cases} 0, при\ \delta > x_0 + A, \omega \le A, \\ тогда\ \dot{y} = \dot{z}, y = z + y_0; \\ 0, при\ \omega > \omega_{\max}, \\ тогда\ \dot{y} = \dot{z}, y = z + y_0 - (A + d_{\text{Сл}} + l_2); \\ 0, при\ \delta \le x_0 + A, \omega \le A, \\ тогда\ \dot{y} = \dot{x}, y = (x - x_0) + y_0; \\ 1, при\ \delta < x_0 + A, \omega > A; \\ 1, при\ (y - y_0) - (x - x_0) \le l_{\text{Ш}}. \end{cases}$$

Взаимное положение поршня-бойка, корпуса и золотника управления обуславливается давлением жидкости в камерах взвода и слива. Поэтому для формирования давлений составляются уравнения расходов жидкости в этих камерах, учитывающие податливость системы, определяемую упругими свойствами и зазорами в сопряжениях.

Уравнение расходов в полости взвода:

$$Q_{\text{Н}} = -Q_{\text{Вн}} + Q_{\text{З}} + Q_g + Q_{\text{СП}} + Q_{\text{МН}} + Q_{\text{К}} + \\ + Q_{\text{УБ}} + Q_{\text{УП}} + Q_{\text{И}}$$

Расход жидкости в камере взвода:

$$Q_{\text{Вн}} = S_{\text{Вн}}\ \dot{x} + \dot{z}\ .$$

Расход жидкости на управление клапаном:

$$Q_{\text{СП}} = S_{\text{СП}}\ \dot{z} - \dot{y}\ ,$$

где

$$S_{\text{З}} = \begin{cases} S_1, при\ \omega < A; \\ (S_1 + S_3) - (S_{\text{УП}} - S_2), при\ \omega > A, (y - \\ - y_0) - (x - x_0) > l_{\text{Ш}}; \\ (S_3 - S_{\text{УП}})\ при\ (y - y_0) - (x - x_0) \le l_{\text{Ш}}. \end{cases}$$

Расход жидкости из камеры взвода в камеру слива:

$$Q_g = \begin{cases} Q_{g1} = \varphi\pi d_{12}(\omega - A)\sqrt{\dfrac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|}\cdot \\ \cdot sign(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}), при\ \omega > A; \\ Q_{g2}, при\ \omega \le A \end{cases}$$

$$Q_{g2} = \begin{cases} Q_{g3} = \dfrac{\pi d_{19} A_{19}^3}{12\mu(A - \omega)} + \dfrac{\pi d_{19} A_{19}(\dot{z} - \dot{y})}{2}, \\ при\ Q_{g3} < Q_{g4}; \\ Q_{g4} = \pi d_{19} A_{19}\varphi\sqrt{\dfrac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|}\cdot \\ \cdot sign\,(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}), при\ Q_{g4} \le Q_{g3}. \end{cases}$$

Расход жидкости на движение поршня-бойка при рабочем ходе:

$$Q_{\text{СП}} = S_{\text{СП}}(\dot{x} + \dot{z}),$$

где

$$S_{\text{СП}} = \begin{cases} S_{\text{ЗП}} - S_{12}, при\ \omega \le A; \\ 0, при\ \ \omega > A. \end{cases}$$

Подача насоса, идущая на деформацию напорной линии и сжатие жидкости:

$$Q_{\text{ШН}} = \frac{P_{\text{Вз}} V_{\text{Н}}}{l_1 + l_2 P_{\text{Вз}}}.$$

Расход жидкости через осевой канал 8:

$$Q_K = \varphi f_{\text{З}}\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|}sign(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}),$$

где

$$f_{\text{З}} = \begin{cases} 0, при\ \omega \le \text{Б}; \\ \pi d_{20}(\omega - \text{Б}), при\ \text{Б} < \omega < \text{Б} + l_n; \\ \pi l_n d_{20}, при\ \omega \ge \text{Б} + l_n. \end{cases}$$

Утечки жидкости в сопряжении поршень-боек – корпус:

$$Q_{\text{УБ}} = \frac{\pi d_4 \Delta_4^3}{12\mu l_{\text{УТ}}}(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}) + \frac{\pi d_4 \Delta_4(\dot{x} + \dot{z})}{2},$$

где

$$l_{\text{УТ}} = \begin{cases} l_4, при\ \delta > \text{В}; \\ l_4 + (\delta - \text{В}), при\ \delta > \text{В}. \end{cases}$$

Утечки через осевой канал 8 при перекрытой радиальной проточке:

$$Q_{\text{УП}} = \begin{cases} 0, при\ \omega > \Gamma + l_{\text{Ц}}; \\ Q_{\text{УП1}} = \dfrac{\pi d_{20}\Delta_{20}^3}{12\mu l_{\text{Ц1}}}(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}) + \\ + \dfrac{\pi d_{20}\Delta_{20}(\dot{x} + \dot{z})}{2}, при\ Q_{\text{УП1}} < Q_{\text{УП2}}; \\ l_{\text{Ц1}} = \begin{cases} l_{\text{Ц}}, при\ \omega \le \Gamma; \\ l_{\text{Ц}} - (\omega - \Gamma), при\ \omega > \Gamma; \end{cases} \\ Q_{\text{УП2}} = \pi d_{20}\Delta_{20}\varphi\sqrt{\dfrac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|}\cdot \\ \cdot sign\,(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}), при\ Q_{\text{УП2}} \le Q_{\text{УП1}}. \end{cases}$$

Расход жидкости на слив при закрытых сливных отверстиях:

$$Q_{\text{И}} = \begin{cases} Q_{\text{И1}} = \dfrac{\pi(P_{\text{Сл}} - P_0)(d_{21}\Delta_{21}^3 d_{20}\Delta_{20}^3)}{12\mu(l_2 d_{20}\Delta_{20}^3 + l_1 d_{21}\Delta_{21}^3)}, \\ при\ \omega > D + d_{\text{Сл}}, Q_{\text{И1}} < Q_{\text{И2}}; \\ l_1 = \omega - (D + d_{\text{Сл}}), l_2 = \omega - E; \\ Q_{\text{И2}} = \pi d_{21}\Delta_{21}\varphi\sqrt{\dfrac{2}{\rho}\left|P_{\text{Сл}} - P_0\right|}\cdot \\ \cdot sign(P_{\text{Сл}} - P_0), при\ \omega > D + d_{\text{Сл}}, Q_{\text{И2}} \le Q_{\text{И1}}. \end{cases}$$

Уравнение расходов в сливной линии:

$$Q_{\text{ШС}} = Q_{\text{Вс}} + Q_{\text{Дс}} + Q_{\text{Сл}} + Q_{\text{ЗС}} + Q_{\text{КС}} + Q_{\text{УБ}}.$$

Подача насоса на деформацию сливной гидролинии и сжатие жидкости:

$$Q_{\text{ШС}} = \frac{P_{\text{Сл}} V_{\text{Сл}}}{l_1 + l_2 P_{\text{Сл}}}.$$

Расход жидкости в сливной полости, связанный с движением поршня-бойка:

$$Q_{\text{Вс}} = \begin{cases} (S_4 - S_{12})(-\dot{x} - \dot{z}), \text{при } \omega \le A; \\ (S_{3П} - S_{12})(-\dot{x} - \dot{z}), \text{при } \omega > A. \end{cases}$$

Расход жидкости из камеры взвода в камеру слива:

$$Q_{gc} = \begin{cases} Q_{g1} = 4\pi d_{19}(\omega - A)\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|} \cdot \\ \cdot sign(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}), \text{при } \omega > A; \\ Q_{g2}, \text{при } \omega \le A. \end{cases}$$

$$Q_{g2} = \begin{cases} Q_{g3} = \frac{\pi d_{19}\Delta_{19}^3}{12\mu(A-\omega)} + \frac{\pi d_{19}\Delta_{19}(\dot{z} - \dot{y})}{2}, \\ \text{при } Q_{g3} < Q_{g4}; \\ Q_{g4} = \pi d_{19}\Delta_{19}\varphi\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|} \cdot \\ \cdot sign(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}), \text{при } Q_{g4} < Q_{g3}. \end{cases}$$

Расход жидкости из камеры слива через сливные отверстия:

$$Q_{\text{Сл}} = \begin{cases} -\varphi f_2\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|P_{\text{Сл}} - P_0\right|}sign(P_{\text{Сл}} - P_0), \\ \text{при } \omega \le D + d_{\text{Сл}}; \\ f_2 = \begin{cases} \frac{\pi d_{\text{Сл}}^2 n_2}{4}, \text{при } \omega \le D; \\ \frac{\pi d_{\text{Сл}} n_2}{4}\left[d_{\text{Сл}} - (\omega - D)\right., \\ \text{при } D < \omega \le D + d_{\text{Сл}}, \end{cases} \\ Q_{\text{И}}, \text{при } \omega > D + d_{\text{Сл}}. \end{cases}$$

Расход жидкости на управление клапаном:

$$Q_{\text{ЗС}} = \begin{cases} \left[(S_{\text{УП}} + S_2) - (S_1 - S_3)\right.\dot{\omega}, \\ \text{при } \omega > A, (y - y_0) - (x - x_0) \ge l_{\text{Ш}}; \\ (S_3 - S_{\text{УП}})\dot{\omega}, \\ \text{при } (y - y_0) - (x - x_0) < l_{\text{Ш}}. \end{cases}$$

Расход жидкости через осевой канал 8:

$$Q_{\text{КС}} = \varphi f_3\sqrt{\frac{2}{\rho}\left|P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}\right|}sign(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}),$$

где

$$f_3 = \begin{cases} 0, \text{при } \omega \le Б; \\ \pi d_{20}(\omega - Б), \text{при } Б < \omega \le Б + l_n; \\ \pi l_n d_{20}, \text{при } \omega \ge Б + l_n. \end{cases}$$

Утечки жидкости через сопряжение поршень-боек – корпус:

$$Q_{\text{У}\delta} = \frac{\pi d_4 \Delta_4^3}{12\mu l_{\text{УТ}}}(P_{\text{Вз}} - P_{\text{Сл}}) + \frac{\pi d_4 \Delta_4(\dot{x} + \dot{z})}{2};$$

где

$$l_{\text{УТ}} = \begin{cases} l_4, \text{при } \delta \ge B; \\ l_4 + (\delta - B), \text{при } \delta < B. \end{cases}$$

Разработанная математическая модель позволяет определить: кинематические, динамические, энергетические характеристики гидропневмоударного агрегата при различных значениях структурных параметров с оценкой устойчивости функционирования, обеспечивая минимум ограничений динамических состояний его элементов.

При разработке алгоритма и блок-схемы особое внимание уделялось обеспечению достаточной степени свободы подвижных масс без наложения жестких ограничений на величину хода и последовательность их движения. Разработка такого алгоритма позволяет проследить реальное поведение исследуемого механизма, раскрыть особенность фаз рабочего цикла и переходных процессов, установить область устойчивой работы, определить его энергетические и кинематические параметры.

На основании алгоритма и блок-схемы разработаны программы реализации симулирования имитационной математической модели элементов гидромолота и гидросистемы управления на ЭВМ [1–4].

Входными данными являются конструктивные параметры гидромолота, начальные условия, выбранные исходя из предлагаемой расчетной схемы, а также параметры гидропривода базовой машины и усилие прижатия рабочего органа.

Выходными данными, выводимыми на печать, являются следующие величины: время, перемещение и скорость бойка клапана и корпуса, давление рабочей жидкости в полостях взвода и слива. Кроме того, в процессе решения определяются максимальные и минимальные значения перемещения и скорости бойка, клапана, корпуса и давления в полостях взвода и слива, которые

также выводятся на печать. Печать организуется в табличном и графическом виде.

В ходе отладки программы была произведена корректировка математической модели, в связи с чем в нее внесены некоторые изменения, обоснование и содержание которых приведены ниже.

Изменено направление отсчета координаты клапана Y. Это связано с тем, что в прежней системе координат начальное значение координаты клапана Y_0 (направление отчета) имело отрицательное значение, что в свою очередь вызвало нежелательные трудности в логической части программы. В связи с изменением направления координаты уравнение (5) примет следующий вид:

$$m_3\ddot{y} = P_{Сл}S_{a2} - P_{Вз} - S_{a1} - K_И \cdot l_{20} \cdot d_{20} \cdot f \cdot$$
$$\cdot P_{Вз} \cdot sign\dot{y} - K_И \cdot l_{21} \cdot d_{21} \cdot f \cdot P_{Сл} \cdot sign\dot{y} -$$
$$-\alpha(\dot{y} - \dot{z}) + m_3 g / \sin\beta \quad K_3,$$

$$K_3 = \begin{cases} 0, если\ \omega \geq \omega_{max}, \\ тогда\ \dot{y} = -\dot{z}, y = -z + y_0 - \omega_{max}; \\ 0, если\ \omega < A, \delta > B, \\ тогда\ \dot{y} = -\dot{z}, y = y_0 - z; \\ 0, если\ \omega < A, \delta < B; \\ тогда\ \dot{y} = \dot{x}, y = x + y_0 - B; \\ 1, если\ A < \omega < \omega_{max}; \\ 1, если\ \omega_n < l_Ш. \end{cases}$$

Обобщенные координаты приняли вид:

а) обобщенная координата поршня-бойка и корпуса: $\delta = x + z$;

б) обобщенная координата корпуса и клапана: $\omega = |x + y - y_0|$;

в) обобщенная координата поршня-бойка и клапана: $\omega_x = y - x - 0{,}335$.

В связи с тем, что точка встречи инструмента с разрушаемым материалом меняется на каждом цикле, т. е. при каждом ударе поршня-бойка по инструменту, были введены специальные коэффициенты *GRB* и *GRH*, которые являются признаком появления силы сопротивления внедрению в корпус.

При каждом ударе бойка по инструменту исчезает связь между корпусом и разрушаемым материалом, т. е. корпус получает свободу перемещения под действием силы прижатия. Корпус имеет возможность перемещаться в пределах $GRH < Z < GRB$. Если $Z < GRH$, то $K_5 = 1$.

Принято допущение, что при выходе координаты корпуса за пределы промежутка $GRH < Z < GRB$ перемещается вся система в целом, т.е. возникает необходимость изменения координат поршня-бойка и клапана на ту же величину, на которую изменилась координата корпуса (*RAZ*).

Начальные значения: $GRB = 0$; $GRH = -0{,}03$. Если $Z < GRH$ или $Z > GRB$, то

$$RAZ = Z - Z_{12}.$$
$$x = x - RAZ;$$
$$y = y - RAZ \cdot K_3,$$

где Z_{12} – предыдущее значение координаты *Z*.

Коэффициенты *GRH* и *GRB* изменяются при каждом ударе поршня-бойка по инструменту на величину внедрения (*VNE*)

$$VNE = \delta - x_0 - x_р;$$
$$GRB = GRB - VNE;$$
$$GRH = GRH - VNE.$$

Из модели и из программы исключен расход Q_g, так как жидкость из полости взвода в полость слива пойдет по пути наименьшего сопротивления, т. е. через осевые каналы, расход через которые описывает $Q_К$.

В выражении (32) функция изменения площади сечения радиальной проточки заменена на функцию f_3 – изменения площади сечения осевых каналов:

$$f_3 = \begin{cases} 0, при\ W \leq Б; \\ bhn_3, при\ W \geq Б + l_n; \\ h(W - Б)n_3, при\ Б < W < Б + l_n, \end{cases}$$

где n_3 – число осевых каналов; *b* – условная ширина канала; *h* – условная высота сечения канала, принятого в форме прямоугольника.

Математическую модель и программу можно использовать для исследования рабочего цикла гидромолота, работающего как с пневмоаккумулятором, так и без него.

В результате моделирования была получена теоретическая осциллограмма рабочего процесса гидромолота.

Из анализа осциллограммы следует, что при начальных условиях: $P_{Вз} = 1$ МПа; $P_{Сл} = 0{,}2$ МПа; $X = 0{,}11$ м; $Y = 0{,}461$ м; $Z = 0$, в начальный момент времени начинается движение корпуса, а вместе с ним и клапана, под действием силы прижатия гидромолота на величину $X_{Вн}$.

Затем корпус посредством инструмента упирается в разрушаемую среду и затормаживается. В полости взвода начинает нарастать давление и происходит взвод (период взвода).

В конце взвода поршень-боек снимает клапан с седла, и затем клапан под действием давления взвода перебрасывается в крайнее верхнее положение (период переключений), соединяя полость взвода с полостью слива через осевые каналы и закрывая отверстия слива (период торможения).

Давление в полостях начинает выравниваться, а скорость движения поршня-бойка начинает уменьшаться. Затем знак скорости меняется на противоположный и происходит рабочий ход. Достигнув скорости $\dot{X}_y$, поршень-боек наносит удар по инструменту, происходит его внедрение.

В конце рабочего хода происходит закрытие клапана.

Клапан отсекает полость взвода от полости слива и открывает сливные отверстия, в результате чего в полости слива резко падает давление. Поршень-боек останавливается, а затем вновь начинается взвод, и цикл повторяется.

Из анализа рабочего цикла можно получить теоретические значения параметров режима работы гидромолота.

Длительность рабочего цикла $t_ц$ составляет 0,4 с, при этом частота ударов будет:

$$n_y = \frac{1}{0,4} = 2,5\,\text{Гц}.$$

Энергия одного удара поршня-бойка равна:

$$A_\delta = \frac{m_\delta (\dot{x}_y)^2}{2} = \frac{76,6(2,38)^2}{2} = 216,7\,\text{Дж}.$$

Ударная мощность:

$$N = A_\delta \cdot n_y = 216,7 \cdot 2,5 = 0,54\,\text{кВт}.$$

При анализе теоретической осциллограммы было выявлено, что обладая кинетической энергией в конце взвода, поршень-боек не успевает затормозиться на пути, предусмотренном в данной конструкции ($S_т$ = 5 мм). В результате чего поршень-боек наносит удар по клапану, что является недопустимым.

Удар по клапану происходит, когда обобщенная координата корпуса и поршня-бойка δ будет равна:

$$\delta_{КР} = B - A - S_Т = 7\,\text{мм}.$$

Для исключения этого явления необходимо либо конструктивно увеличивать путь торможения, либо возможно включение пневмоаккумулятора. Необходимая величина пути торможения без пневмоаккумулятора равна:

$$S'_Т = S_Т + |\delta_{\min}| + \delta_{КР} = 33\,\text{мм}.$$

При отладке программы было также выявлено, что расход жидкости $Q_К$ через осевой канал из полости взвода в полость слива является недостаточным для быстрого выравнивания давлений в конце рабочего хода, в связи с чем закрытие клапана не происходит в нужный момент и продолжительность рабочего цикла увеличивается. Поэтому необходимо увеличить площадь сечения осевых каналов или их количество. При увеличении площади сечения канала в 1,5 раза закрытие клапана происходит нормально.

По аналогии была реализована имитационная модель [5] самобалансного двумассового гидропневмоударного агрегата [6].

Представленная технология математического моделирования позволяет уже на этапе проектирования анализировать работоспособность и эффективность проектируемых конструкций гидропневмоударных агрегатов, что позволяет повысить качество проектных решений при одновременном сокращении сроков проектирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ереско С. П., Ереско Т. Т. Имитационная модель самобалансного гидромолота (HYDROM) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610637. 2001.
2. Ереско С. П. Имитационная модель уплотнительного узла (UPLOT) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610049. 2002.
3. Ереско С. П., Ереско А. С., Васильев С. И., Ереско Т. Т., Ереско В. С. Имитационная модель гидроцилиндра (GYDROZ) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611074. 2004.
4. Ереско С. П. Имитационная модель гидросистемы (GYDROSYS) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004611723. 2004.
5. Ереско Т. Т., Ереско С. П., Тубольцев А. А., Саблев А. В. Имитационная модель гидропневмоударного агрегата (HYDROM2) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005613005. 2005.
6. Ереско С. П., Тублольцев А. А., Ереско Т. Т., Ереско А. С., Ереско В. С Ударное устройство // Патент России № 43575 2005, Бюл. № 3.

УДК 539.421

Вансович Константин Александрович,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа, стандартизация и сертификация»,
Омский государственный технический университет,
тел.: (3812)-65-23-49, 8-913-965-54-74, e-mail: vansovichka@mail.ru
Аистов Игорь Петрович,
д-р техн. наук, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность»,
Омский государственный технический университет,
тел.: (3812)-23-06-51, 8-960-984-54-48, e-mail: aistov_i@mail.ru

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В УСЛОВИЯХ ДВУХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

K.A. Vansovich, I.P. Aistov

CRACKS GROWTH IN BIAXIAL CONDITIONS ESTIMATION CRITERIA

Аннотация. *Предлагается критерий, определяющий кинетику роста усталостных трещин, развивающихся по типу нормального отрыва, на стадии стабильного их роста при различной степени двухосности напряженного состояния.*

Ключевые слова: *механика разрушения, усталостная трещина, скорость роста, двухосное напряженное состояние.*

Abstract. *The criteria for defining kinematics of growth of fatigue cracks which develop as a normal separation, at a stage of their stable growth for various biaxial tension degree is offered.*

Keywords: *fracture mechanics, fatigue crack, growth rate, biaxial tension.*

Значительные успехи, которые были достигнуты в области изучения кинетики роста усталостных трещин за последнее время, объясняются использованием линейной механики разрушения. В частности, была установлена зависимость скорости роста усталостных трещин от величины размаха коэффициента интенсивности напряжений за цикл нагружения ΔK_I. Достаточно полный обзор критериев, определяющих скорость роста усталостных трещин, приведен в работе [1]. При одноосном нагружении скорость роста усталостных трещин нормального отрыва удовлетворительно описывается формулой Пэриса [2]:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \left(\Delta K_I\right)^n, \qquad (1)$$

где C, n – константы материала; a – размер трещины; N – число циклов нагружения.

Попытки применить эту формулу для описания скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении привели к противоречивым результатам: в одних случаях скорость роста трещин оказалась выше полученной экспериментально, а в других ниже [3, 4]. Предполагается, что такое несоответствие связано как с различием механизмов разрушения в образцах, использованных авторами, так и с тем, что величина ΔK_I не полностью характеризует напряженное состояние в вершине трещины при двухосном нагружении.

Целью настоящей работы является разработка критерия, определяющего кинетику роста усталостных трещин, развивающихся по типу нормального отрыва, на стадии стабильного роста при двухосном стационарном нагружении.

Основой при разработке такого критерия явились результаты экспериментальных исследований, проведенных на широко распространенном алюминиевом сплаве АК6 при различных видах нагружения. При этом предполагалось, что предлагаемый единый критерий имеет смысл только в том случае, если разрушение во всех случаях нагружения происходит по одинаковому механизму. Двухосность нагружения достигалась применением образцов крестообразной формы с толщиной рабочей части 10 мм (рис. 1).

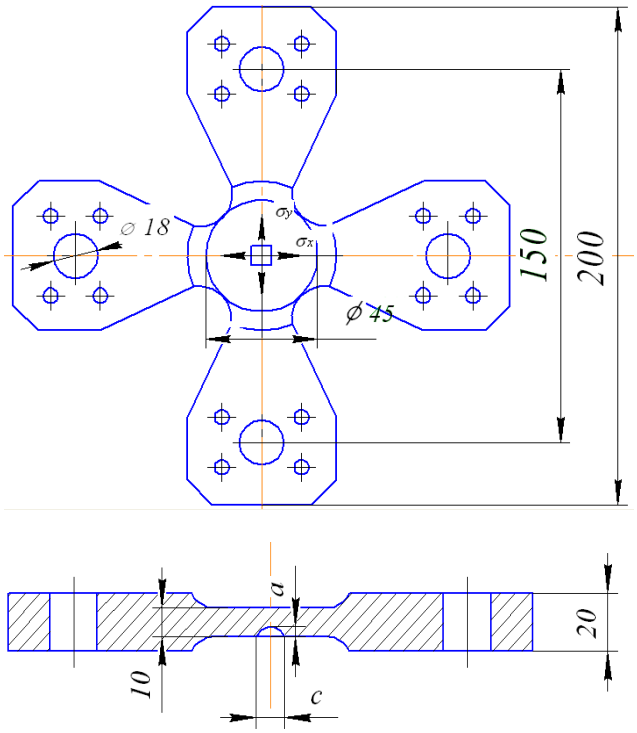


Рис. 1. Образец для двухосных испытаний: a – глубина полуэллиптической поверхностной трещины; c – размер трещины на поверхности образца

На одной стороне рабочей части образца горизонтально наносился концентратор, от которого в процессе испытаний зарождалась поверхностная трещина. Нагружение образцов осуществлялось на испытательной машине ГРМ-I с пульсатором. В вертикальном направлении растягивающее нагружение (перпендикулярно плоскости трещины) получали непосредственно от захватов испытательной машины. Для создания нагрузки в горизонтальном направлении были разработаны и использовались специальные приспособления – реверсоры. Степень двухосности номинального напряженного состояния, т. е. без учета трещины, определялась величиной коэффициента двухосности нагружения $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$ (рис. 1). Вертикальные напряжения σ_y перпендикулярны плоскости трещины и в процессе нагружения раскрывают её. Горизонтальные напряжения σ_x параллельны плоскости трещины, и формально наличие трещины не влияет на их величину. При одноосном растяжении, когда $\sigma_x = 0$, $\lambda = 0$; при растяжении-сжатии была реализована величина $\lambda = -0{,}9$; при двухосном растяжении $\lambda = +0{,}9$.

Как показали проведенные испытания, независимо от формы концентратора, вида нагружения и уровня напряжений с момента зарождения трещины её фронт стремится принять форму полуокружности. В дальнейшем, по мере роста трещины, её полукруглая форма сохраняется почти до момента выхода на заднюю поверхность. Такая «устойчивая» форма несквозной трещины дает возможность определять её глубину a по результатам измерений размеров трещины c, сделанных на передней поверхности образца. В проведенных экспериментах считалось, что скорость роста несквозных трещин по всем направлениям, нормальным фронту трещины, одинакова.

В процессе испытаний через определенное число циклов нагружения измерялся размер трещины c по передней поверхности образца. Результаты этих измерений представлены на рис. 2.

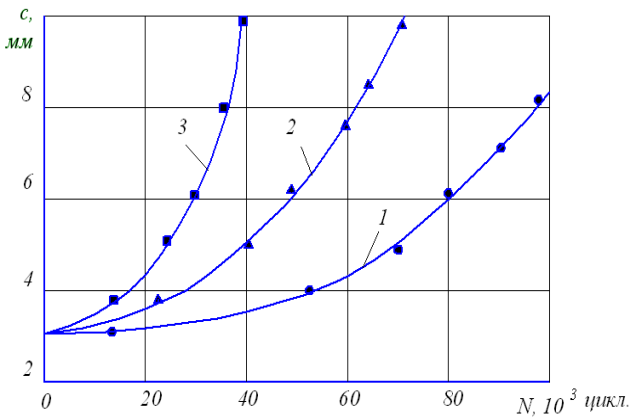


Рис. 2. Влияние способа нагружения крестообразного образца из сплава АК6 на рост усталостных трещин; σ_y = 120 МПа: 1 – λ = –0,9; 2 – λ = 0; 3 – λ = +0,9

Графическим дифференцированием этих диаграмм определялась скорость роста усталостных трещин по передней поверхности образца dc/dN (рис. 3).

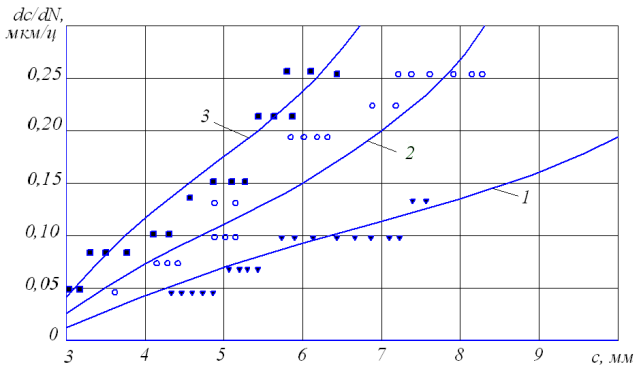


Рис. 3. Диаграмма зависимости скорости роста трещины от её размера: σ_y = 120 МПа; 1 – λ = –0,9; 2 – λ = 0; 3 – λ = +0,9; ▼○■ – шаг усталостных бороздок δ

В работе [5] представлены микрофрактографические исследования поверхностей изломов испытанных образцов из алюминиевого сплава АК6 на электронном сканирующем микроскопе в ГосНИИ ГА, приведенные Шанявским А.А. Для всех видов нагружения на изломах были выделены общие фрактографические признаки вблизи концентратора напряжений наблюдался псевдоборoздчатый рельеф, затем бороздчатый и ямочно-бороздчатый рельефы. Стадии стабильного роста во всех случаях соответствовал бороздчатый рельеф (рис. 4). Подобие рельефов свидетельствует о подобии механизмов разрушения на стадии стабильного роста с бороздчатым рельефом.

Рис. 4. Микрофрактограмма усталостного излома алюминиевого сплава АК6

Наличие бороздчатого рельефа на изломе образца позволило определять скорость роста несквозной трещины в направлении её глубины a по величине шага бороздок. Экспериментально установлено, что за один цикл нагружения на поверхности излома появляется одна усталостная бороздка [5], а это означает, что

$$da/dN = \delta, \qquad (2)$$

где δ – шаг усталостной бороздки.

Для сравнения скорости роста усталостных трещин по передней поверхности образца и вглубь его были построены диаграммы $dc/dN - c$ и $\delta - c$, которые в совмещенном виде показаны на рисунке 3.

При растяжении-сжатии скорость роста трещины оказалась ниже, а при двухосном растяжении – выше, чем при одноосном нагружении. Результаты испытаний были представлены в координатах $da/dN - \Delta K_I$ (рис. 5).

Величина K_I вычислялась по формуле [6], которая учитывает только номинальные раскрывающие напряжения $\sigma = \sigma_y$ [6]:

$$K_I = \frac{\sigma\sqrt{\pi \cdot a}}{\int_0^{\pi/2}\left(1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2}\sin^2\varphi\right)^{1/2} d\varphi}, \qquad (3)$$

где σ – напряжения, перпендикулярные плоскости трещины; a – глубина полуэллиптической поверхностной трещины; c – размер трещины на поверхности образца; φ – текущая угловая координата, определяющая положение точки по фронту трещины.

Большой разброс экспериментальных точек на этой диаграмме не позволил получить удовлетворительной аппроксимации зависимости $\ln(da/dN) - \ln \Delta K_I$ одной прямой линией, описываемой формулой Пэриса в логарифмических координатах. Однако для каждого вида нагружения результаты испытаний удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями. Из этого следует, что скорость роста трещин необходимо связывать не только с величиной раскрывающих напряжений σ_y и коэффициентом интенсивности напряжений K_I, но и с характеристикой напряженного состояния в области трещины $\lambda = \sigma_x/\sigma_y$.

В связи с этим было сделано предположение о том, что скорость роста трещины зависит как от величины ΔK_I, вычисленной по раскрывающим напряжениям σ_y, так и от степени двухосности напряженного состояния λ. Отметим, что все полученные ранее выводы справедливы только на стадии стабильного роста трещины, когда за один цикл нагружения образуется одна усталостная бороздка. Это отражает условие автомодельного роста усталостной трещины [7], которое характеризуется существованием единственного параметра, определяющего скорость роста трещины. В связи с этим было предложено ввести понятие эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений

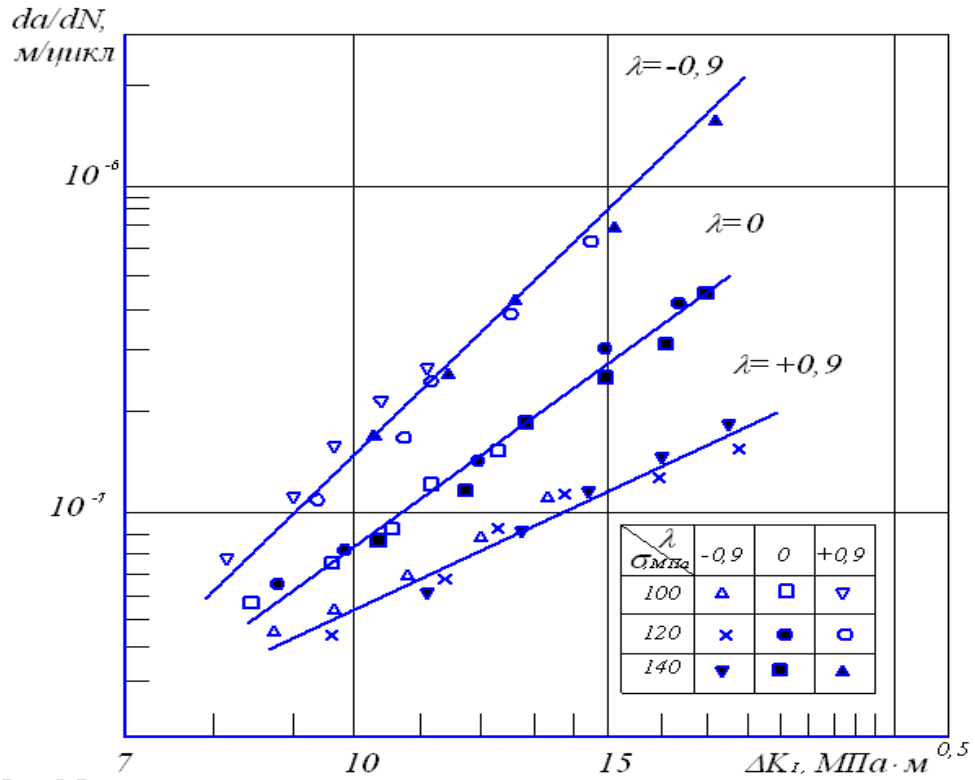


Рис. 5. Влияние вида нагружения на кинетические диаграммы усталостного разрушения

$$K_I^* = f(\lambda) \cdot K_I, \qquad (4)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений, вычисленный по напряжениям, раскрывающим трещину.

В выражении (4) функция $f(\lambda)$ принята в виде

$$f(\lambda) = \sqrt{1 + k \cdot \lambda}, \qquad (5)$$

где k – новая константа материала, характеризующая его чувствительность к двухосному нагружению и подлежащая определению в результате описанных выше испытаний.

Будучи представленной в такой форме, функция $f(\lambda)$ отражает следующие экспериментальные факты: при $\lambda > 0$ скорость роста трещины возрастает, а при $\lambda < 0$ скорость роста трещины убывает по отношению к одноосному нагружению, при $\lambda = 0$ функция $f(\lambda) = 1$.

Численные значения функции $f(\lambda)$ определены по кинетическим кривым из условия, что при различных видах нагружения одинаковым скоростям роста трещины соответствуют одинаковые значения ΔK_I^*. Найденные значения $f(\lambda)$ использовались для определения константы k, которую можно рассматривать как одну из характеристик материала.

По результатам испытаний была построена обобщенная кинетическая диаграмма зависимости скорости роста усталостных трещин от величины ΔK_I^* в логарифмических координатах (рис. 6), на которой зависимость $da/dN - \Delta K_I^*$ удовлетворительно аппроксимируется одной прямой.

Это позволило представить зависимость между скоростью роста трещины и величиной размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I в виде, аналогичном формуле Пэриса:

$$\frac{da}{dN} = C\left(\sqrt{1 + k\lambda} \cdot \Delta K_I\right)^n, \text{ или}$$

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_I^*\right)^n. \qquad (6)$$

Отметим, что в таком выражении формула Пэриса является частным случаем предложенной зависимости при $\lambda = 0$.

После обработки результатов экспериментов и определения констант было получено уравнение для определения скорости роста трещины при двухосном нагружении в сплаве АК6

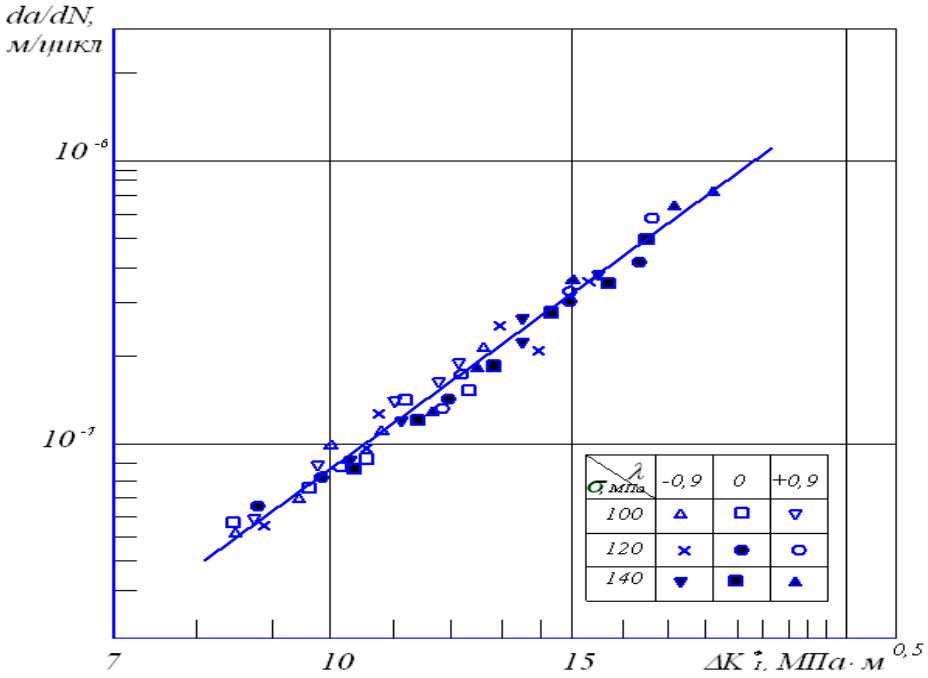


Рис. 6. Обобщенная кинетическая диаграмма для алюминиевого сплава АК6

$$\frac{da}{dN} = 0{,}68 \cdot 10^{-11}\left(\sqrt{1+0{,}28\lambda} \cdot \Delta K_I\right)^4. \qquad (7)$$

Таким образом, предложенный критерий ΔK_I^* позволяет, по мере накопления данных, результаты испытаний, проведенных при одноосном нагружении, использовать для определения скорости роста трещины в условиях двухосного нагружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудряшов В. Г. Смоленцев В. И. Вязкость разрушения алюминиевых сплавов. – М. : Металлургия, 1976. – 296 с.
2. Paris P., Erdogan F. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws // Basic Eng. – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528–534.
3. Miller K. J. Fatique Under Complex Stress // Metal Science. – 1977. – Vol. 2, № 8–9. – P. 432–438.
4. Tanaka K., Hoshide T., Yamoda A., Taird S. Fatique Crack Propagation in Biaxial Stress Fields // Fatique Eng. Mat. – 1979. – Vol. 2, № 2. – P. 181–194.
5. Шанявский А. А. Кинетика роста несквозных усталостных трещин в элементах самолетных конструкций // Наука и техника гражданской авиации. – Сер. : Летательные аппараты и двигатели – М. : ЦНТИ ГА – 1982. – № 2. – С. 19–22.
6. Shah R. C., Kobajashi A. S. Intensity Factor an Elleptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending Stress // Stress Analysis and Growth of Crack. – ASTME. – 1971. – P 3–21.
7. Иванова В. С.. Шанявский А. А. Количественная оценка длительности стабильного роста магистральной усталостной трещины методами фактографии // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М. : Наука, 1981. – С. 168–193.

УДК 629.4.027.118: 626.2 (043.3)

Буйносов Александр Петрович,
канд. техн. наук, доцент, кафедра «Электрическая тяга»,
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
тел. (343) 358-55-04, (343) 345-59-32, e-mail: byinosov@mail.ru, ABuinosov@et.usurt.ru
Пышный Игорь Михайлович,
аспирант, кафедра «Электрическая тяга»,
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
тел. (343) 358-55-04, e-mail: igorkz45@mail.ru
Тихонов Виктор Артурович,
аспирант, кафедра «Электрическая тяга»,
Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
тел. (343) 358-55-04, e-mail: va.tikhonov@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАТЯГА БАНДАЖА НА ОБОДЕ КОЛЕСНОГО ЦЕНТРА ЛОКОМОТИВА

A.P. Buinosov, I.M. Pishniy, V.A. Tikhonov

DEFINITION BANDAGE TIGHTENING ON THE RIM OF WHEEL CENTERS LOCOMOTIVES

Аннотация. *Ослабление диаметра посадки бандажа на ободе колесного центра является неисправностью, непосредственно угрожающей безопасности движения подвижного состава. Кроме угрозы безопасности движения это приводит к длительному простою локомотива во внеплановом ремонте для выкатки колесной пары из-под локомотива с целью перетяжки или замены бандажа.*

Ключевые слова: *локомотив, колесная пара, бандаж, обод, натяг, определение, ослабление посадки.*

Abstract. *The weakening of the tie-diameter landing on the rim of the wheel center of a malfunction directly threatens the rolling stock safety. In addition to safety threats, it leads to a prolonged outage of the locomotive in unscheduled repairs to rolling out the wheelset from the locomotive to the waist or replacement bandage.*

Keywords: *locomotive, wheel pair, bandage, rim, tightness, definition, weakening of the landing.*

Ослабление посадки бандажа на ободе колесного центра является неисправностью, непосредственно угрожающей безопасности движения подвижного состава. Кроме угрозы безопасности движения это приводит к длительному простою локомотива во внеплановом ремонте для выкатки колесной пары из-под локомотива с целью перетяжки или замены бандажа [1].

Колесная пара – один из ответственных элементов механической части локомотива, от технического состояния которого непосредственно зависит безопасность движения. Для обеспечения безопасности движения и минимизации расходов при ремонте необходимо внедрение современных технологий, связанных с разработкой новых способов контроля. Применяемая технология формирования колесных пар на железнодорожном транспорте общего и необщего пользования предполагает использование соединений с гарантированным натягом в зоне контакта сопрягаемых деталей «бандаж – обод колесного центра». Недостаточная прочность таких соединений нередко приводит к опасным бракам в эксплуатационной работе [2].

Для решения указанных задач на кафедре «Электрическая тяга» Уральского государственного университета путей сообщения разработана методика определения величины натяга бандажа на ободе колесного центра после формирования колесной пары в эксплуатации.

Использовалась зависимость величины и формы ультразвуковых импульсов, отраженных от границы «бандаж – обод» от контактного напряжения. Сама возможность применения этого эффекта начиная с 50-х гг. XX века признается учеными разных стран. Однако усложняющие факторы, такие как овальность, конусность, сложная форма и неодинаковая толщина бандажей, не позволяли решить эту задачу. Только в настоящее время, с развитием современной электронной техники, появилась такая возможность.

Значительную трудность для осуществления контроля прочности посадки по величине и форме импульсов, отраженных от границы «бандаж –

обод», представляет отклонение от идеальной формы контактных поверхностей. Согласно действующей инструкции ОАО «РЖД» № ЦТ/329 [3] допускается овальность посадочной поверхности не более 0,2 мм и конусность не более 0,1 мм. Для уменьшения «эффекта» конусности исследовались сигналы, отраженные от середины контактной поверхности бандажа с ободом колесного центра.

При рассмотрении геометрии ультразвукового поля дискового излучателя было установлено, что в ближней зоне волна распространяется без расхождения, протяженность которой определяется по формуле $L_б = \alpha^2 / \lambda.$

В нашем случае радиус пьезоэлемента составляет $\alpha = 6$ мм. При частоте $\nu = 2{,}5$ мГц в стали длина волны $\lambda = 2{,}3$ мм и $L_б \approx 15$ мм (рис. 1). Учитывая, что в дальней зоне половинный угол раскрытия θ составляет

$$\theta = \arcsin(0{,}61 \cdot \lambda / \alpha), \qquad (1)$$

т. е. $\theta \approx 14\,°C$, при толщине бандажа $l = 90$ мм получим, что падающая на границу бандаж обод ультразвуковая волна имеет вид овала с площадью

$$S \approx \left[\alpha + (l - L_б) \cdot \mathrm{tg}\theta\right]^2 \pi. \qquad (2)$$

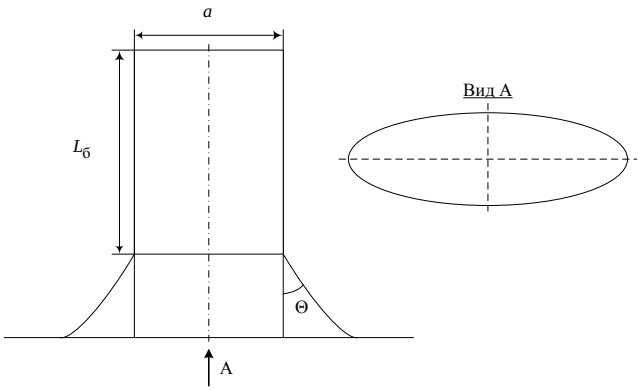


Рис. 1. Схема ультразвукового поля, создаваемого пьезоэлементом

Представляет интерес оценка погрешности, которая получается, если предположить, что интенсивность ультразвуковой волны падает только вследствие ее расхождения. В этом случае интенсивность $\Im$ обратно пропорциональна площади поперечного сечения волны

$$\Im_2 / \Im_1 = S_1 / S_2. \qquad (3)$$

Средние координаты первого $Y_{\text{ср.1}}$ и второго донного $Y_{\text{ср.2}}$ сигналов: $Y_{\text{ср.1}} = 94{,}4$ мм, $Y_{\text{ср.2}} = 185{,}7$ мм. Подставив в формулу (2) $l_1 = 2Y_{\text{ср.1}}$, $l_2 = 2Y_{\text{ср.2}}$, получим площадь поперечного сечения S_1 и S_2 УЗК в месте регистрации донных сигналов при условии, что их поле имеет вид усеченного конуса при $S_1 = 7120$ мм^2 и $S_2 = 26300$ мм^2. Среднее значение амплитуды первого донного импульса составляет $N_{1\text{ср.}} = 95{,}5$ пикселей. Переведем это значение в дБ

$$N_{\text{дБ}} = 20\lg(N / N_0). \qquad (4)$$

Для дефектоскопа УД3-103 $N_0 = 52{,}6$, тогда $N_{1\text{ср.дБ}} = 5{,}18_{\text{дБ}} + Д_Э$ ($Д_Э$ – значение ослабления на экране, $Д_Э = 24$дБ). Среднее значение второго донного сигнала $N_{2\text{ср.}} \approx 43{,}0$ пикселя. Переведем это значение в дБ:

$$N_{2\text{ср.дБ}} = -1{,}75_{\text{дБ}} + Д_Э, \qquad (5)$$

тогда

$$\Delta Д = \Delta N = N_{1\text{ср.дБ}} - N_{2\text{ср.дБ}}, \qquad (6)$$

или $\Delta Д = 6{,}93$дБ.

Определим фактическое отношение интенсивностей УЗК при регистрации первого и второго донных импульсов. Так как $N = 10 \cdot \lg \Im / \Im_0$, то

$$\Im_2 / \Im_1 = 10^{\Delta Д / 10}. \qquad (7)$$

$\Im_2 / \Im_1 = 0{,}203$, из [4] теоретическое отношение $(\Im_2 / \Im_1)_{\text{Т}} = 0{,}271$.

Разница между фактической и теоретической интенсивностями составляет 25 %. Это обусловлено поглощением и рассеянием волны в бандаже, упрощением ультразвукового поля при расчетах. Вследствие непараллельности отражающих поверхностей, при каждой регистрации сигнала пьезоэлемент (ПЭП) оказывается все дальше отстоящим от центральной оси ультразвукового поля, где интенсивность волны меньше. Кроме того, при каждом отражении от поверхности бандажа происходит частичная трансформация продольной волны в поперечную и поверхностную. Эти волны распространяются с другими скоростями и в других направлениях, что приводит к уменьшению амплитуды главного участка регистрируемого импульса. Наконец, амплитуда и форма донного импульса зависят от коэффициента отражения границы «бандаж – обод» [5].

Из-за сложности распространения ультразвука, информацию о состоянии контакта «бандаж – обод» могут нести только первый и второй донный импульсы. Учитывая это, эмпирически было выбрано оптимальное положение ПЭП на поверхности бандажа так, чтобы амплитуды донных импульсов были максимальны. При всех измерениях ПЭП устанавливался на поверхности катания таким образом, чтобы расстояние между точкой входа центрального луча и боковой гранью бандажа со стороны опорного буртика составляло

63 мм. Это расстояние фиксировалось с помощью поводка, закрепленного на корпусе пьезопреобразователя.

Другой существенной проблемой в применении метода является допускаемая при изготовлении бандажа и колесного центра овальность посадочных поверхностей. По этой причине в отдельных участках контактирующих поверхностей механические напряжения превышают расчетные, а в отдельных участках контактное механическое напряжение может вообще отсутствовать [6].

Овальность не влияет на распределение напряжений, если направления больших полуосей эллиптических посадочных поверхностей совпадают. Зоны контроля можно было бы точно определить, если бы была известна ориентация этих полуосей, что на практике нереально. Для уменьшения влияния овальности зондирование контактирующих поверхностей производилось в шести местах, равномерно распределенных вдоль окружности бандажа. Схема расположения участков ультразвукового контроля показана на рис. 2.

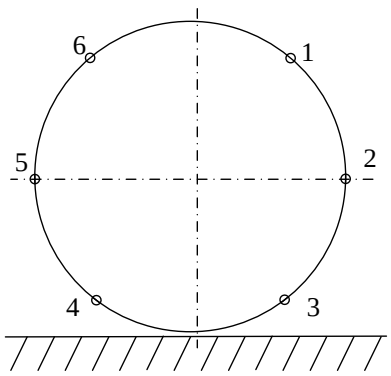


Рис. 2. Схема расположения участков ультразвукового контроля

Существенно повлиять на величину импульсов могут помехи, связанные с изменением поглощения и рассеяния ультразвука средой [7]. Участки материала с крупнозернистой структурой сильнее рассеивают УЗК, что при большой протяженности исследуемого объекта может привести к значительному ослаблению донных сигналов.

Для установления степени влияния структурных реверберации в бандажной стали на амплитуду донных импульсов по результатам серии измерений была определена наиболее вероятная средняя разность амплитуд первого и второго донных импульсов $A_0 = \Delta N_{12} = 52{,}47$ пикселей. Измерения производились по экрану дефектоскопа при одинаковых показаниях аттенюатора. Разность амплитуд донных сигналов при *n*-м измерении A_n

$$A_n = N_1^n - N_2^n, \qquad (8)$$

где N_1^n – амплитуда первого донного импульса при *n*-м измерении; N_2^n – амплитуда второго донного импульса при *n*-м измерении.

Разница между разностью амплитуд при *n*-м измерении и средней разностью амплитуд $p_n = A_n - A_0$.

Вероятная погрешность измерений $\Delta A_{\text{ОВ}}$

$$\Delta A_{\text{ОВ}} = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + \ldots + p_n^2}{n(n-1)}} \qquad (9)$$

В нашем случае число измерений $n = 51$. Тогда $\Delta A_{\text{ОВ}} = 0{,}95$ пикселей. Вероятная относительная погрешность $\gamma_{\text{ОВ}}$

$$\gamma_{\text{ОВ}} = \frac{\Delta A_{\text{ОВ}}}{A_0} \cdot 100\ \%, \qquad \gamma_{\text{ОВ}} = 1{,}8\ \%. \qquad (10)$$

Аналогичные вычисления, выполненные по результатам серии измерений, дают $A_0 = 51{,}57$ пикселей.

Измерения проводились в 2007–2010 гг. в колесном цехе Екатеринбургского электровозоремонтного завода (ЕЭРЗ) – филиала ОАО «Желдорреммаш», в котором используются бандажи колесных пар, изготовленные ОАО «НТМК». Поскольку измерения проводились в течение длительного времени, то по полученным результатам можно судить о стабильности структуры бандажной стали.

Эксперименты показали, что на амплитуду второго донного импульса в некоторой степени влияет неравномерность прижатия ПЭП к поверхности катания бандажа, в то время как стабильность амплитуды первого донного импульса легко обеспечивается.

Для оценки этого фактора по результатам серии измерений определена наиболее вероятная средняя разность амплитуд зондирующего импульса и первого донного $A_0 = \Delta N_{01} = 57{,}01$ пикселей при одинаковых показаниях аттенюатора дефектоскопа. Разность амплитуд сигналов при *n*-м измерении A_n

$$A_n = N_0^n - N_1^n, \qquad (11)$$

где N_0^n – амплитуда зондирующего импульса при *n*-м измерении; N_1^n – амплитуда первого донного импульса при *n*-м измерении.

Разница между амплитудами при *n*–м измерении и средней разностью амплитуд $p_n = A_n - A_0$.

Вероятная погрешность измерений $\Delta A_{\text{ОВ}}$

$$\Delta A_{\text{ОВ}} = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{p_1^2 + p_2^2 + \ldots + p_n^2}{n(n-1)}}. \qquad (12)$$

В нашем случае число измерений $n = 161$. Тогда $\Delta A_{\text{ов}} = 0{,}16$. Или $\Delta A_{\text{ов}} = 0{,}033$ дБ. Относительная вероятная погрешность $\gamma_{\text{ов}}$

$$\gamma_{\text{ов}} = \frac{\Delta A_{\text{ов}}}{A_0} \cdot 100\%, \quad \gamma_{\text{ов}} = 0{,}29\ \%. \qquad (13)$$

Это в шесть раз меньше, чем для разности между первым и вторым импульсами.

В процессе производства измерений было установлено, что разность показаний ΔN_{01} между зондирующим и первым донным импульсами меняется в гораздо меньших пределах, чем разность между первым и вторым донными импульсами ΔN_{12}. Поэтому ΔN_{01} была выбрана за индикатор дефектов, которые могут значительно изменить форму донных импульсов.

После анализа количества значений ΔN_{01} по результатам измерений установлена величина порога $\Delta N_{01} \prec 67$ (67 – число делений по экрану дефектоскопа, что соответствует $\Delta N_{01} \prec 9{,}8$ дБ), если это условие не выполнялось, то измерение заменялось измерением на другом участке бандажа, отстоящем по окружности примерно на 10 см.

Установлено, что в большинстве случаев «аномальное» ослабление первого донного импульса происходит за счет рассеяния УЗК в районе, прилегающем к поверхности катания. Поэтому, если при значении параметра «отсечка», равном 5 %, импульсы, прилегающие к зондирующему сигналу, имеют протяженность более 30 мм (1 клеточка экрана), то такое измерение также игнорировалось и заменялось измерением в другом (соседнем) месте.

Для проверки возможности регистрации зависимости величины и формы донных импульсов от контактного давления исходя из полученных данных проведенных экспериментов определено среднее значение разности амплитуд $\Delta N_{01\text{ср.}}$ зондирующего и первого донного импульсов для суммы мест 6 и 1 (см. рис. 2) $\Delta N_{01\text{ср.}} = \sum \Delta N_{01} / n = 3081/54 = 57{,}06$ ($n = 54$ – число измерений). Для суммы мест 2 и 5 среднее значение разности амплитуд $\Delta N_{01\text{ср.}} = 3024/53 = 57{,}06$, для суммы мест 3 и 4 $\Delta N_{01\text{ср.}} = 3074/54 = 56{,}93$. Разброс результатов составляет 0,2 %, что свидетельствует о высокой точности измерений.

А. П. Буйносовым был выполнен обзор работ по определению площади касания шероховатых поверхностей в зависимости от контактного давления для некоторых сталей, где показано, что для материалов с высокой твердостью эти площади не превышают нескольких процентов от номинальной площади [8]. В нашем случае перед посадкой бандаж подвергается нагреву, что изменяет состояние поверхности и делает затруднительным теоретическое определение фактической площади контакта. Однако ясно, что пропорционально натягу возрастает контактное давление на границе «бандаж – обод», что ведет к увеличению площади касания поверхностей, а значит к уменьшению коэффициента отражения ультразвука и уменьшению интенсивности донного сигнала [9].

Определим пределы изменения механических напряжений на границе «бандаж – обод». Известно [10], что при толщине бандажа 90 мм и натяге $\Delta D = 1{,}9$ мм контактные напряжения составляют в среднем $\delta_{\perp} = 32{,}3$ мПа и изменяются прямо пропорционально натягу, поэтому $\delta_{\perp} = k \cdot \Delta D$, откуда $k = 17$ мПа/мм. При $\Delta D = 1{,}5$ мм, $\delta_{\perp} = 25{,}5$ мПа, а при $\Delta D = 1{,}7$ мм, $\delta_{\perp} = 28{,}9$ мПа, следовательно, при изменении натяга в допустимых пределах от 1,5 мм до 1,7 мм контактные напряжения возрастают на 13,3 %.

Следующим этапом проведенных исследований был анализ полученных зависимостей соотношения импульсов от величины натяга по результатам измерений в 2007–2010 гг. на ЕЭРЗ. Работа была выполнена при температуре в колесном цехе $t = 15\ ^{\circ}C$ при одинаковом значении усиления дефектоскопа ►3 при специально созданной настройке «084», основные параметры которой: $\gamma = 2{,}5$ мГц; $\upsilon = 5850$ м/с; время ПЭП 2,3 мкс; длина развертки 284 мм; отсечка 0,5 %. Все измерения выполнялись с одним ПЭП № 132.

Для уменьшения эффекта овальности, как указывалось выше, данные снимались в шести участках бандажа равномерно по окружности, после чего однотипные параметры суммировались.

При расчетах учитывалось, что увеличение толщины бандажа на 1 мм вблизи среднего значения уменьшает амплитуду донного импульса на 0,09 дБ.

Из анализа экспериментальных данных следует, что в хорошей корреляционной зависимости от натяга находится выражение

$$B = \sum \frac{N_0}{N_1} \cdot \sum h_1, \qquad (14)$$

где N_0 – амплитуда зондирующего импульса; N_1 – амплитуда первого донного импульса; h_1 – ширина первого донного импульса, пикселей.

Каждая сумма имеет шесть слагаемых по числу мест измерения. Определение зависимости $B = f(\varepsilon)$ осуществлялось с помощью методов регрессионного анализа, который позволяет обработать полученный статистический материал с минимальной потерей информации (ε – натяг при

посадке бандажа на обод колесного центра). Рассматриваемая зависимость была описана линейной функцией вида $B = a + b \cdot \varepsilon$ (a, b – коэффициенты аппроксимации, определяемые из статистических данных по методу наименьших квадратов). При оценке надежности коэффициента корреляции убедились, что его абсолютная величина превышает среднюю квадратичную ошибку σ_r не менее чем в 3 раза, т. е. $r / \sigma_r \succ 3$.

Таким образом, при увеличении ε в пределах, установленных [3], т. е. 1,45–1,72 мм, параметр B увеличивается на 9,6 %, что существенно и сравнимо с возрастанием контактного напряжения. Анализ формы импульсов показал, что при изменении ε заметно изменяется крутизна n_1 ската (заднего фронта) первого донного импульса. Для бандажей под нагрузкой среднее значение отношения N_1 / n_1 для мест 1 и 6 (см. рис. 2) вверху бандажа на 5 % больше, чем внизу. Следовательно, при увеличении контактного давления крутизна заднего фронта n_1 увеличивается.

Для подтверждения данной закономерности была проведена серия экспериментов при использовании режима работы дефектоскопа УД3-103 с двумя периодами в зондирующем импульсе. Исследовалась зависимость параметра C

$$C = \sum \frac{n_1}{0{,}01 \cdot N_1}. \qquad (15)$$

где n_1 – спад величины импульса на трех ступеньках, пикселей.

Значения величины C суммировались для шести измерений у каждого испытуемого бандажа. Эмпирическая зависимость $C = f(\varepsilon)$ была описана линейной функцией вида $C = a + b \cdot \varepsilon$. Установлено, что при изменении величины натяга (ε) в установленных [3] пределах параметр C увеличивается примерно на 19 %, однако имеет место значительный разброс результатов. Дальнейшие исследования показали, что при изменении формы зондирующего импульса характер зависимости также изменяется. Тем не менее, этот эффект в совокупности с другими признаками может служить критерием для определения натяга бандажа.

В процессе анализа экспериментальных данных было обнаружено, что в режиме работы дефектоскопа с одним периодом в зондирующем импульсе вершина первого донного импульса имеет вид буквы «U» и разность между пиками вершины находится в корреляционной зависимости от натяга.

Аналогично, как и для величин B и C, зависимость $U = f(\varepsilon)$ была описана линейной функцией вида $\sum U = a + b \cdot \varepsilon$.

Проведена серия измерений параметров поверхностей волны, распространяющейся вдоль окружности опорного буртика до и после посадки бандажа. Опорный буртик практически не испытывает наклепа во время эксплуатации колесной пары и имеет достаточные размеры для того, чтобы получить необходимую точность измерений с помощью штатных приборов.

При толщине контролируемого изделия, равной размерам буртика, для частот $f \geq 400$ кГц скорость поверхностных волн не зависит от изменений этих частот, которые для дефектоскопа УД2-102 могут достигать 10 %. При этом измерялось время распространения УЗК вдоль окружности опорного буртика, анализировалась совокупность первых и вторых сквозных сигналов. Поскольку в ограниченном пространстве УЗК трансформируются в волны различного типа, распространяющиеся с разными скоростями, в память прибора записывался «стопкадр» с информацией о всех типах волн, а также сведения о натяге и номер бандажа. Кроме того, указывалась измеренная температура бандажа. В результате каждой серии экспериментов было получено более 100 «стопкадров», которые затем анализировались.

Установлено, что расположение импульсов на экране дефектоскопа незначительно, однако зависит от направления излучения УЗК вдоль окружности, что, по-видимому, обусловлено асимметрией звукового поля пьезоэлемента и различным характером отражения волн на неровностях поверхностей. Поэтому в дальнейшем, для определенности, все излучения УЗК производились против часовой стрелки. Фиксированным было и положение излучателя на буртике – у левой кромки клейма.

Важным является учет температурного фактора. Из анализа известных для некоторых сталей экспериментальных данных было принято, что при нагревании на 1 °С скорость поверхностных волн уменьшается на 1 м/с. Это значит, например, что при нагревании на 30 °С время прохождения сигнала по опорному буртику возрастает на Δt = 11,1 мкс. Температура измерялась с точностью до 1 °С в верхней и нижней части бандажа, за результат бралось среднее значение.

Метод оценки натяга основан на зависимости скорости распространения поверхностных волн (волн Рэлея) от напряженного состояния твердого тела. При увеличении механических напряжений в бандажной стали скорость распространения волн Рэлея уменьшается, что приводит к увеличению времени прохождения сигнала. Кроме того, время распространения поверхностных волн зависит изменение геометрических размеров бандажа при посадке на ободе колесного центра.

В результате анализа набора полученных сигналов для исследования выбраны импульсы,

обусловленные поверхностными волнами, поскольку, как сказано выше, их скорость не подвержена изменению при различных значениях частоты. При рассмотрении «стопкадров», полученных до и после насадки бандажей, установлена корреляционная зависимость между параметрами сигналов и натягом. Разработана программа обработки полученных данных.

Определим время t распространения волн Рэлея вдоль окружности буртика, фронт которых перпендикулярен плоскости бандажа, при нормальной температуре $\Theta_0 = 20\ ^\circ C$. Условную длину буртика будем считать $l_0 = 3297$ мм, а скорость УЗК $V_0 = 3032$ м/с, тогда

$$t_0 = l_0/V_0 + t_{ПЭП}, \qquad (16)$$

где $t_{ПЭП}$ – время распространения УЗК в пьезоэлементе по паспорту, $t_{ПЭП} = 45$ мкс.

Следует иметь в виду, что реальное $t_{ПЭП}$ несколько меньше указанного, поскольку путь ультразвука в пьезоэлементе при регистрации сквозных сигналов несколько меньше, чем при регистрации отраженных. Из выражения (16) – $t_0 = 1132$ мкс. Существенным является учет зависимости скорости V УЗК от температуры. Анализируя данные, известные для некоторых сталей, в расчетах остановимся на величине 1 м/(с·°С). Тогда

$$V = V_0 + 1\cdot(20 - \Theta), \qquad (17)$$

где V – скорость поверхностных волн при температуре Θ.

Определим изменение времени Δt распространения сигнала при температуре Θ по сравнению с временем t_0. Очевидно, что

$$\Delta t = \frac{l_0(1+\alpha\cdot\theta)}{V} - \frac{l_0}{V_0}, \qquad (29)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения для стали, $\alpha = 1{,}2\cdot10^{-5}$ 1/°С.

Для облегчения учета температурного фактора в расчетах будем определять разность между временем t регистрации каждого импульса и значением

$$t' = (1088 + \Delta t)\ \text{мкс}. \qquad (19)$$

где Δt – изменение времени распространения сквозных сигналов при изменении температуры от 20 °С до Θ; 1088 мкс – экспериментально полученное время, соответствующее началу серии первых сквозных импульсов, созданных поверхностной волной при 20 °С у ненасаженного бандажа.

Кроме температуры время распространения сигнала в буртике зависит от его размеров и скорости УЗК, а эти два фактора связаны с натягом бандажа. Для ряда сталей установлено, что макро- и микронапряжения снижают скорость ультразвука в них. Следовательно, при увеличении натяга оба фактора увеличивают время распространения сигнала. Поскольку трудно идентифицировать данный импульс при измерениях в разных условиях, анализировался их спектр в интервале $[t';\ t'+65]$ мкс для первого сквозного сигнала.

Функция T_1 (где J_t – интенсивность импульса в момент времени t)

$$T_1 = \frac{\int_{t'}^{t'+65}(t-t_1)J_t\,dt}{\int_{t'}^{t'+65}J_t\,dt}, \qquad (20)$$

характеризует совокупность первых сквозных импульсов. Ее значение не зависит от абсолютной величины интенсивностей импульсов, а определяется только их координатами и относительной величиной. T_1 определяет положение «центра тяжести» интенсивностей серии первых сквозных сигналов на оси времени по отношению к точке t'.

Функция $\Delta Z = T_1' - T_1$ не зависит явно от времени прохождения сигнала через пьезоэлемент $t_{ПЭП}$ и должна находиться в корреляционной зависимости от натяга. Поскольку подсчет интегралов от интенсивности на участках затруднен, для проверки этой гипотезы заменим интегрирование суммированием

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t-t_1)J_t}{\sum_{i=1}^{n}J_t}, \qquad (21)$$

где n – число импульсов на данном интервале; t – координата импульса интенсивностью J_i.

По определению $N = 10\cdot\lg(J/J_0)$ (J_0 – пороговое значение интенсивности ультразвуковой волны, $J_0 = 10^{-12}$ Вт/м^2, N – сила УЗК, дБ), тогда $J = 10^{(\frac{N}{10}-12)}$.

Выразим пороговое значение интенсивности через силу УЗК N, получим

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t-t')10^{(\frac{N_i}{10}-12)}}{\sum_{i=1}^{n}10^{(\frac{N_i}{10}-12)}}. \qquad (22)$$

Амплитуды сигналов измеряются с точностью до 0,1 дБ либо с помощью дефектоскопа УД3-103, имеющего эту дискретность измерения, либо с помощью УД2-102, измеряя амплитуду в пикселях и определяя силу УЗК в дБ по градуировочной таблице.

Измерения времени регистрации импульсов производились в режиме «Лупа. Ручная метка», где погрешность измерения составляет 1,25 мкс (по информации, полученной непосредственно у главного инженера фирмы «Пеленг»). В пределах указанных зон на частоте 400 кГц и усилением

80 дБ регистрировали 6 или 7 первых сквозных сигналов или 6 вторых. Измерялась амплитуда N и время регистрации сигнала t, по приведенным выше выражениям рассчитывались параметры T_1 и T_1'. Установлено, что в хорошей корреляционной зависимости с величиной натяга находится функция $\Delta Z = T_1' - T_1$ (T_1 и T_1' – параметры, определяющие положение «центра тяжести» интенсивностей, т. е. статистический момент интенсивностей серии первых сквозных сигналов до и после насадки).

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i - t_0)10^{(\frac{N_i}{10}-12)}}{\sum_{i=1}^{n}10^{(\frac{N_i}{10}-12)}}$$

и

$$T_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(t_i' - t_0)10^{(\frac{N_i'}{10}-12)}}{\sum_{i=1}^{n}10^{(\frac{N_i'}{10}-12)}}. \qquad (23)$$

В ходе обработки экспериментальных данных выяснилось, что наиболее вероятным является значение ΔZ = 7 мкс, и это существенно превышает погрешность измерений.

Таким образом, показана возможность определения натяга с помощью опорного буртика. Развитие аппаратных средств позволяет для более точного определения ΔZ реализовать разработанное программное обеспечение для дефектоскопа УД2-102. Можно повысить точность измерений, применяя более высокую частоту УЗК, равную 620 кГц, которая имеется, например, у дефектоскопа УД3-103.

При определении зависимости величины ΔZ от величины натяга $\Delta Z = f(\varepsilon)$ с помощью методов регрессионного анализа рассматриваемая зависимость, как и для аналогичных зависимостей, для величин B, C и U, была описана линейной функцией.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность определения натяга бандажа по величине и форме ультразвуковых импульсов, отраженных от поверхности контакта пары «бандаж – обод».

2. Разработана методика оценки количественной величины натяга бандажа на ободе колесного центра при насажанных бандажах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буйносов А. П. Повышение ресурса бандажей колёсных пар электровозов в условиях эксплуатации : дис. ... канд. техн. наук. М., 1992. – 336 с.
2. Буйносов А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. – 224 с.
3. Инструкция по формированию, ремонту и содержанию колесных пар тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. : с изм. и доп., утв. указ. МПС России от 23.08.2000 г., № К-2273у : ЦТ-329. – Утв. 14.06.1995. – М. : МПС РФ, 1995. – 48 с.
4. Грек В. И. Прочность соединения бандажа с центром колес подвижного состава с учетом действия тепловых нагрузок при торможении : дис ... канд. техн. наук. – Коломна, 1990. – 191 с. Д-8343-90
5. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М. : Металлургия, 1985. – 257 с.
6. Буйносов А. П. Методы повышения ресурса колесных пар тягового подвижного состава: Монография. – М.: УМЦ по образованию на ж.-д. трансп., 2010. – 244 с.
7. Зуев Л. Б., Семухин Б. С., Бушмелева К. И. Зависимость скорости ультразвука от действующего напряжения при пластическом течении кристалла // Журн. техн. физики. – 1999. – № 12. – С. 100–101.
8. Буйносов А. П. Влияние лубрикации на тяговые свойства электровоза ВЛ11 // Вестник РГУПС. – 2011. – № 1. – С. 39–42.
9. Буйносов А. П. Модель эксплуатационного износа сложных систем железнодорожного транспорта // Вестник транспорта Поволжья. – 2010. – № 4(24). – С. 21–25.
10. Буйносов А. П. Выбор оптимального остаточного проката бандажей колесных пар электровозов ВЛ11 // Транспорт Урала. – 2010. – № 2 (25). – С. 45–47.

УДК 62-251; 62-755

Артюнин Анатолий Иванович,
д-р техн. наук, профессор, проректор ИрГУПС, тел./факс: 83952638

ОБЩИЙ МЕТОД РАСЧЕТА АВТОБАЛАНСИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ РОТОРОВ МАШИН С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ

A.I. Artyunin

TOTAL METHOD OF ACCOUNTING OF AUTOBALANCE EQUIPMENT OF ROTOR OF MACHINES WITH BIG NUMBER OF FREEDOM DEGREES

Аннотация. *Рассматриваются подходы к построению математических моделей сложных роторных систем. Предлагается нетрадиционное техническое решение по использованию вращающихся маятников. Обсуждаются вопросы обеспечения устойчивости автобалансировки.*

Ключевые слова: *роторы машин, балансировочные процессы, вращающиеся маятники, гашение колебаний.*

Abstract. *Approaches to complicate rotor systems of mathematical models creating are considered. A nontraditional technical decision as rotor pendulum for absorbtion of oscillations is discussed.*

Keywords: *rotors of machines, balancing processes, rotor pendulum, absorbtion of oscillation.*

Основным агрегатом технологических машин для измельчения материалов служит один или несколько массивных роторов с укрепленными на них рабочими органами различного типа (ножи, фрезы, молотки и др.). Особенностью динамики таких машин является меняющаяся во время технологического процесса неуравновешенность ротора с рабочими органами. Эффективным способом компенсации этой неуравновешенности может служить применение автобалансировочных устройств.

В основу разработанного метода расчета автобалансировочных устройств роторов машин с большим числом степеней свободы положена динамическая модель машины, представляющая собой систему твердых тел с упруго-демпфирующими связями и входящего в эту систему ротора с автобалансировочным устройством маятникового типа. Примем, что все упругие связи линейны, а силы сопротивления носят характер «вязкого» трения. Ротор будем считать расположенным горизонтально, а его осевые смещения, которые не влияют на процесс балансировки, учитывать не будем. Автобалансировочное устройство в выбранной модели представляет собой четыре маятника одинаковой массы m и длины l, попарно установленные с возможностью свободного вращения с каждой стороны ротора. Такое количество маятников вызвано необходимостью компенсации динамической неуравновешенности ротора. Будем также считать, что двигатель машины имеет достаточную мощность и ротор вращается с постоянной угловой скоростью ω.

Обобщенная динамическая модель машины с ротором и автобалансировочным устройством изображена на рис. 1. Движение модели будем изучать по отношению к неподвижной системе отсчета $0xyz$, причем ось x направим вдоль оси ротора, когда он находится в положении статического равновесия, а оси y и z таким образом, чтобы система координат была правой. В качестве обобщенных координат ротора, как бы он ни был закреплен (или жесткое крепление к одному из твердых тел, которое назовем корпусом, или установлен на упругие опоры), при любом расположении ротора по отношению к корпусу выберем следующие: y, z – перемещения точки 0_1 пересечения оси ротора с плоскостью его сечения, проходящего перпендикулярно оси ротора через центр масс ротора, в направлении осей y, z, θ, ψ – углы поворота ротора относительно осей, проходящих через его центр масс параллельно осям y, z неподвижной системы координат; φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 – углы поворота маятников. В качестве остальных обобщенных координат динамической модели могут быть выбраны координаты центров масс и углы поворота твердых тел. На эти координаты ограничения не накладываются.

При указанных условиях дифференциальные уравнения, описывающие движение динамической модели, состоят из уравнений для машины с ротором, которые в матричной форме имеют вид

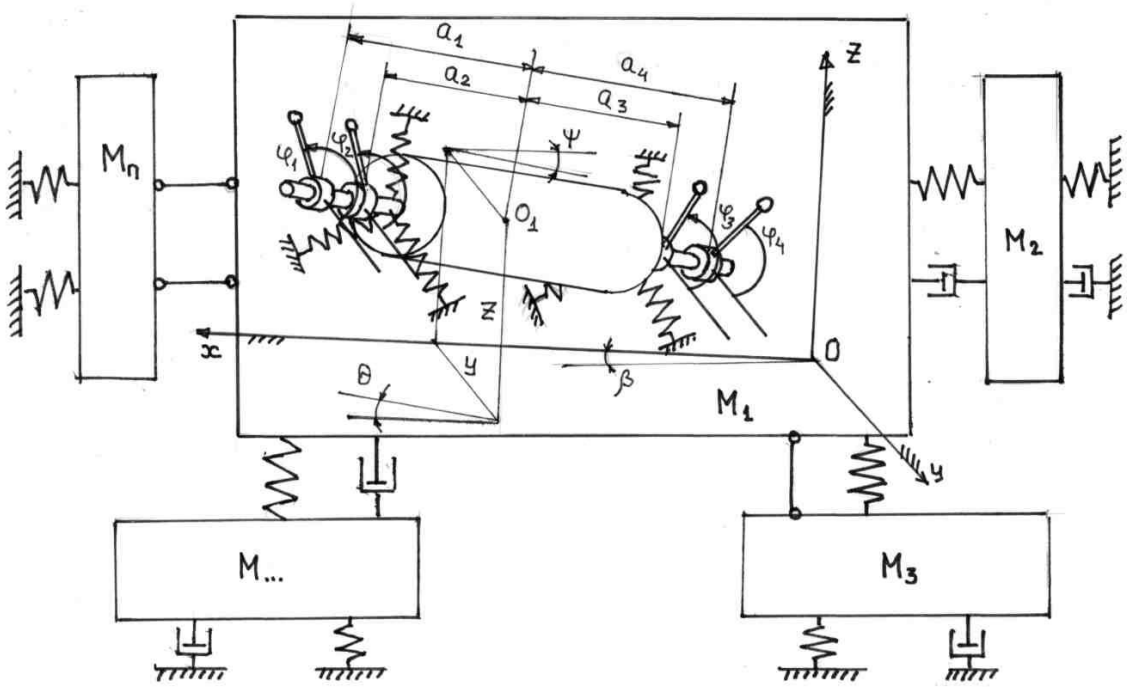


Рис. 1. Обобщенная динамическая модель машины с ротором и автобалансирующим устройством маятникового типа

$$[M]\{\ddot{q}\}+([B]+[G])\{\dot{q}\}+[K]\{q\}=\{F\}+\{f_e\}, \quad (1)$$

и уравнений для маятников автобалансира:

$$\ddot{\phi}_k+\beta_0\left(\dot{\phi}_k-\omega\right)=\left[\frac{\ddot{y}\sin\phi_k-\ddot{z}\cos\phi_k}{l}+\right.$$

$$\left.+\frac{a_k\sigma_k\left(\ddot{\theta}\sin\phi_k-\ddot{\psi}\cos\phi_k\right)-g\cos\phi_k\cos\beta}{l}\right]. (k=\overline{1,4}) \quad (2)$$

Здесь использованы обозначения $\{M\},\{B\},\{G\},\{K\}$ – соответственно матрицы инерции, демпфирования, гироскопических коэффициентов и жесткостей; $\{q\}=\{y,z,\theta,\psi,q_1...,q_m\}^T$ – вектор обобщенных координат; y,z,θ,ψ – обобщенные координаты ротора; q_i – обобщенные координаты других элементов динамической модели; β_0 – коэффициент сопротивления; g – ускорение свободного падения; $a_к$ – расстояние от центра масс ротора до точки подвеса каждого маятника (в дальнейшем из-за малости расстояния между маятниками в одной паре по сравнению с $a_к$ примем $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$; β – угол между осью ротора и ее проекцией на горизонтальную плоскость; $\{f_e\}$ – вектор или сумма векторов внешних воздействий, отражающих влияние технологического процесса, а также других механизмов машин (при расчете параметров автобалансира и его зон устойчивости примем $\{f_e\}=\{0\}$).

Вектор возмущающих сил от дисбаланса и автобалансира $\{F\}$ при выбранных обобщенных координатах имеет вид:

$$\{F\}=$$

$$=\begin{Bmatrix} M_p e\omega^2\cos\omega t+ml\sum_{k=1}^{4}\left(-\ddot{\phi}_k\sin\phi_k+\dot{\phi}_k^2\sin\phi_k\right); \\ M_p e\omega^2\sin\omega t+ml\sum_{k=1}^{4}\left(-\ddot{\phi}_k\cos\phi_k+\dot{\phi}_k^2\sin\phi_k\right); \\ (A-C)\delta\omega^2\cos(\omega t-\varepsilon)+mla\sum_{k=1}^{4}\sigma_k\left(\ddot{\phi}_k\sin\phi_k+\dot{\phi}_k^2\cos\phi_k\right); \\ (A-C)\delta\omega^2\sin(\omega t-\varepsilon)+mla\sum_{k=1}^{4}\sigma_k\left(-\ddot{\phi}_k\cos\phi_k+\dot{\phi}_k^2\sin\phi_k\right); \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где M_p, A, C – масса, экваториальный и полярный моменты инерции ротора; e, δ, ε – характеристики динамической неуравновешенности ротора (e – эксцентриситет массы ротора; δ – угол между осью вращения и главной центральной осью инерции ротора; ε – угол между главным вектором и вектором главного момента сил дисбаланса); $\sigma_к = 1$ при $к = 1, 2$ и $\sigma_к = -1$ при $к = 3, 4$.

Так же, как в других исследованиях по автоматической балансировке роторов [1], [2], [4], для построения периодических решений стационарного движения обобщенной динамической мо-

дели машины с ротором и автобалансировочным устройством, определения зон устойчивости и выбора параметров автобалансира используем метод малого параметра [3].

Рассмотрим нелинейные дифференциальные уравнения (1), (2) и найдем такие решения этих уравнений, а также условия их существования и устойчивости, при которых $y(\omega t)=z(\omega t)=\theta(\omega t)=\psi(\omega t)=0$ или, по крайней мере, остаются достаточно малыми, т. е. решения, отвечающие автобалансировочному режиму движения.

Исходя из того, что силы сопротивления движению маятников малы, а само их движение близко к равномерному вращательному, введем в уравнения (2) малый параметр μ и запишем их следующим образом:

$$\ddot{\varphi}_k=\mu\Phi_k\left(\varphi_k,\dot{\varphi}_k,\ddot{y},\ddot{z},\ddot{\theta},\ddot{\psi}\right),\ k=\overline{1,4} \qquad (4)$$

где

$$\Phi_k\left(\phi_k,\dot{\phi}_k,\ddot{y},\ddot{z},\ddot{\theta},\ddot{\psi}\right)=-\beta_0\left(\dot{\phi}-\omega\right)+$$

$$\left[\ddot{y}\sin\phi_k-\ddot{z}\cos\phi_k+a\sigma_k\left(\ddot{\theta}\sin\phi_k-\ddot{\psi}\cos\phi_k\right)-g\cos\phi_k\cos\beta\right]/l.$$

Предполагая, что изменение обобщенных координат ротора и машины является периодическим, а движение маятников близко к равномерному вращательному, будем искать решение уравнений (1), (4) в виде:

$$q=q(\omega t);\ \ \varphi_k=\omega t+\alpha_k+\mu\Phi^*(\omega t),\ \ k=\overline{1,4} \qquad (5)$$

где $q(\omega t)$ – периодические функции времени t с периодом $T=2\pi/\omega$ и α_k – неизвестные постоянные. В соответствии с методом малого параметра, подставляя φ_k из (5) при μ=0 в (1), получим порождающую систему уравнений:

$$[M]\{\ddot{q}_0\}+([B]+[G])\{\dot{q}_0\}+[K]\{q_0\}=\{F_c\}\cos\omega t+\{F_s\}\sin\omega t \qquad (6)$$

Здесь $\{F_c\}=\{D,N,S,W,0,...,0\}^T$;

$\{F_s\}=\{-N,D,-W,S,0,...,0\}^T$,

где

$$D=Me\omega^2+ml\omega^2\left(\cos\alpha_1+\cos\alpha_2+\cos\alpha_3+\cos\alpha_4\right);$$

$$N=ml\omega^2\left(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2+\sin\alpha_3+\sin\alpha_4\right); \qquad (7)$$

$$S=(A-C)\omega^2\delta\cos\varepsilon+mla\omega^2\left(\cos\alpha_1+\cos\alpha_2-\cos\alpha_3-\cos\alpha_4\right)$$

$$W=-(A-C)\omega^2\delta\sin\varepsilon+mla\omega^2\left(\sin\alpha_1+\sin\alpha_2-\sin\alpha_3-\sin\alpha4\right)$$

Как видно из (6), уравновешивание будет иметь место, если *D = N = S = W = 0.*

Тогда, приравнивая нулю правые части выражений (7) и вводя обозначения:

$$\eta=\frac{Me}{ml};\ \xi=\frac{(A-C)\delta\cos\varepsilon}{ml};\ \zeta=\frac{(A-C)\delta\sin\varepsilon}{ml},$$

получим следующую систему уравнений для определения неизвестных постоянных α_k:

$$\begin{aligned}
&1.\ \cos\alpha_1+\cos\alpha_2+\cos\alpha_3+\cos\alpha_4=-\eta;\\
&2.\ \sin\alpha_1+\sin\alpha_2+\sin\alpha_3+\sin\alpha_4=0;\\
&3.\ \cos\alpha_1+\cos\alpha_2-\cos\alpha_3-\cos\alpha_4=-\xi/a; \qquad (8)\\
&4.\ \sin\alpha_1+\sin\alpha_2-\sin\alpha_3-\sin\alpha_4=\zeta/a.
\end{aligned}$$

Среди множества решений тригонометрических уравнений (8) основными будут являться следующие:

$$\alpha_1=\pi-\operatorname{arctg}\left[\frac{\zeta}{\eta a+\xi}\right]-\arccos\left[\frac{1}{4a}\sqrt{\zeta^2+\left(\eta a+\xi\right)^2}\right];$$

$$\alpha_2=-\pi-\operatorname{arctg}\left[\frac{\zeta}{\eta a+\xi}\right]+\arccos\left[\frac{1}{4a}\sqrt{\zeta^2+\left(\eta a+\xi\right)^2}\right];$$

$$\alpha_3=\pi-\operatorname{arctg}\left[\frac{\zeta}{\eta a-\xi}\right]-\arccos\left[\frac{1}{4a}\sqrt{\zeta^2+\left(\eta a-\xi\right)^2}\right];$$

$$\alpha_4=-\pi-\operatorname{arctg}\left[\frac{\zeta}{\eta a-\xi}\right]+\arccos\left[\frac{1}{4a}\sqrt{\zeta^2+\left(\eta a-\xi\right)^2}\right]. \qquad (9)$$

Так как косинус любого угла может быть только меньше или равен единице, то из (9) следует:

$$\left.\begin{aligned}
&\left[(A-C)\delta\sin\varepsilon\right]^2+\left[M_pea+(A-C)\delta\cos\varepsilon\right]^2\le(4mla)^2\\
&\left[(A-C)\delta\sin\varepsilon\right]^2+\left[M_pea-(A-C)\delta\cos\varepsilon\right]^2\le(4mla)^2
\end{aligned}\right\}. \qquad (10)$$

Полученные выражения (10) представляют собой условия для выбора параметров маятников автобалансира.

Следующим этапом расчета является определение зон устойчивости автобалансира в зависимости от угловой скорости ротора и постоянных α_1, α_2, α_3, α_4. Периодические решения порождающей системы уравнений (6) будем искать в виде:

$$q_{0i}=a_i\cos\omega t+b_i\sin\omega t\ .\ (i=\overline{1,n})$$

Подставляя это выражение в (6) и приравнивая коэффициенты при $\cos\omega t$ и $\sin\omega t$, получим систему алгебраических уравнений порядка 2n относительно a_i и b_i ($n=m+4$, m – число обобщенных координат динамической модели машины).

$$[A]\{q_0\}=\{F_0\}, \qquad (11)$$

где $\{q_0\}=\{a_1,b_1,a_2,b_2,...,a_n,b_n\}^T$;

$$\{F_0\}=\{D,-N,N,D,S,-W,W,S,0,...,0\}^T.$$

Так как $\{q_0\}=[A]^{-1}\{F_0\}$, то

$$\begin{aligned}
a_i&=\left(a_{j1}+a_{j4}\right)D+\left(-a_{j2}+a_{j3}\right)N+\left(a_{j5}+a_{j8}\right)S+\\
&+\left(-a_{j6}+a_{j7}\right)N;\\
b_i&=\left(a_{k1}+a_{k4}\right)D+\left(-a_{k2}+a_{k3}\right)N+\left(a_{k5}+a_{k8}\right)S+\\
&+\left(-a_{k6}+a_{k7}\right)N,
\end{aligned} \qquad (12)$$

где $j = 2i - 1$; $k = 2i$ (i – номер обобщенной координаты), $a_{j1},...,a_{j8},a_{k1},...,a_{k8}$ – элементы матрицы $[A]^{-1}$.

При достаточно малом μ периодическим решением порождающей системы уравнений, зависящих от постоянных $\alpha_к$, только тогда соответствуют асимптотически устойчивые периодические решения исходных уравнений, когда для постоянных $\alpha_к$, удовлетворяющим уравнением $P_s(\alpha_1, ..., \alpha_к) = 0$, $s = \overline{1,k}$ выполняется условие, заключающееся в требовании отрицательности вещественных частей всех корней алгебраического уравнения:

$$\left| \frac{\partial P_s}{\partial \alpha_j} - \delta_{sj}\lambda \right| = 0, \; s, j = \overline{1,k}, \qquad (13)$$

где $P_s(\alpha_1,\alpha_2,...,\alpha_к)$ – порождающие функции, δ_{sj} – символ Кронекера. Порождающие функции $P_s(\alpha_1,\alpha_2,...,\alpha_к)$ находятся после подстановки q_{0i} и $\varphi_{k0} = \omega t + \alpha_k$ в правые части (4) и усреднения полученных выражений:

$$P_s(\alpha_1, \alpha_2, ..., \alpha_к) = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} \Phi_k\left(\varphi_{k0}, \ddot{y}_0, \ddot{z}_0, \ddot{\theta}_0, \ddot{\psi}_0\right) dt.$$

В нашем случае:

$$P_k(\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4) = -\frac{\omega^2}{2l}\left[\begin{array}{l}\left(\tilde{A}D + \tilde{C}N + \tilde{E}S + \tilde{G}W\right)\sin\alpha_k + \\ +\left(\tilde{B}D + \tilde{K}N + \tilde{F}S + \tilde{H}W\right)\cos\alpha_k\end{array}\right], \qquad (14)$$

где $\tilde{A} = a_{11} + a_{14} + a_{41} + a_{44} + a(a_{51} + a_{54} + a_{81} + a_{84})$

$\tilde{B} = a_{21} + a_{24} - a_{31} - a_{34} + a(a_{61} + a_{64} + a_{71} + a_{74})$;

$\tilde{C} = -a_{12} + a_{13} - a_{42} + a_{43} + a(-a_{52} + a_{53} - a_{82} + a_{83})$;

$\tilde{K} = -a_{22} + a_{23} + a_{32} - a_{33} + a(-a_{62} + a_{63} - a_{72} + a_{73})$;

$\tilde{E} = a_{15} + a_{18} + a_{45} + a_{48} + a(a_{55} + a_{58} + a_{85} + a_{88})$;

$\tilde{F} = a_{25} + a_{28} - a_{35} - a_{38} + a(a_{65} + a_{68} - a_{75} - a_{78})$;

$\tilde{G} = -a_{16} + a_{17} - a_{46} + a_{47} + a(-a_{56} + a_{57} - a_{86} + a_{87})$;

$\tilde{H} = -a_{26} + a_{27} + a_{36} - a_{37} + a(-a_{66} + a_{67} + a_{76} - a_{77})$.

Здесь D, N, S, W определяются из (7). Полученные в аналитической форме выражения для порождающих функций позволяют найти частные производные $\partial P_s / \partial \alpha_k$, то есть элементы определителя (13):

$$\frac{\partial P_s}{\partial \alpha_j} = \frac{m\omega^4}{2}\left[\left(\tilde{A} + a\sigma_s\tilde{E}\right)\sin\alpha_s\sin\alpha_j - \left(\tilde{G} + a\sigma_s\tilde{G}\right)\sin\alpha_s\cos\alpha_j + \left(\tilde{B} + a\sigma_s\tilde{F}\right)\cos\alpha_s\sin\alpha_j - \left(\tilde{K} + a\sigma_s\tilde{H}\right)\cos\alpha_3\cos\alpha_j\right]. \qquad (15)$$

Раскрывая определитель (13), получим алгебраическое уравнение 4-го порядка относительно λ, для которого проверку отрицательности вещественных частей корней нетрудно провести с помощью какого-либо критерия, например критерия Рауса – Гурвица. Если вещественные части корней полученного алгебраического уравнения при заданном значении ω отрицательны, решение порождающей системы уравнений (6) близко к решению исходной системы уравнений и при этом значении ω режим движения, соответствующий автоматической балансировке, осуществим и устойчив. Задаваясь каждый раз новым значением ω, можно определить диапазон угловых скоростей ротора, в котором автобалансир будет работать устойчиво, то есть определить зоны устойчивости работы автобалансировочных устройств, когда будет происходить компенсация дисбаланса ротора, возникающего вследствие технологического процесса.

Метод позволяет на основе несложного алгоритма разработать компьютерную программу для определения параметров и зон устойчивости автобалансировочных устройств роторов машин с большим числом степеней свободы. В отличие от ранее предлагавшихся способов [2], [4], которые можно было использовать только тогда, когда число степеней свободы роторной системы было не больше четырех, данный метод позволяет рассчитывать автобалансировочные устройства для роторов машин со сколько угодно большим числом степеней свободы.

Кроме того, предложенный подход можно использовать для разработки метода расчета автобалансировочных устройств конечноэлементных моделей роторов и машин, на которых они установлены.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Блехман И. И. Синхронизация динамических систем. – М. : Наука, 1971. – 896 с.
2. Кравченко В. И. Исследование устойчивости шарового автобалансира рядного типа. – М. : Машиноведение, 1983. – № 1. – С. 25–27.
3. Малкин И. Г. Некоторые задачи в теории нелинейных колебаний. – М. : Гостехиздат, 1956. – 492 с.
4. Нестеренко В. П. Автоматическая балансировка роторов приборов и машин со многими степенями свободы. – Томск. : Изд-во. Томск. ун-та, 1985. – 83 с.

УДК 621.01

Московских Александр Олегович,
аспирант ИрГУПС, тел.: (3952) 588444, e-mail: alexmoskow@gmail.com
Савченко Андрей Александрович,
зав. лабораторией ИрГУПС, тел.: (3952) 59-84-28
Абросимова Юлия Олеговна,
аспирант ИрГУПС, тел.: (3952) 59-84-28

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

A.O. Moskovskich, A.A. Savchenko, Yu.O. Abrosimova

ELECTRODYNAMIC TIES IN MECHANICAL OSCILLATION SYSTEMS

Аннотация. *Рассматриваются вопросы построения математических моделей механических систем с электродинамическими устройствами. Показано существование пассивных, активных связей и внутренних конструктивных связей. Предлагается концепция введения активных цепей путем создания контура формирования управляющей силы через реализацию связи напряжения и одного или нескольких параметров состояния виброзащитной системы. Приводится ряд примеров.*

Ключевые слова: *активные виброзащитные системы, электродинамические связи, управление по абсолютному и относительному отклонениям и по возмущению.*

Abstract. *Questions of creature of mathematical models of mechanical systems with electrodynamic ties are considered. Existence of passive, active and inside constructive ties are shown. Concept of introduction active links for creature of control for realization ties between electrical tension and parameters of condition of vibroprotection systems are offered. Several examples are shown.*

Keywords: *active vibroprotection systems, electrodynamic ties, control systems on absolute, relative parameters and disturbance of force.*

Введение

Изменение динамических свойств механических систем в задачах динамики машин чаще всего связано с введением в структуру системы дополнительных цепей различной природы: рычажные механизмы [1], пневматические и гидравлические устройства [2,3], а также электродинамические связи [4]. Последние обладают определенными преимуществами, которые заключаются в сравнительной простоте регулирования параметров. Несмотря на значительное распространение электродинамических устройств в различных отраслях техники (электромеханика, электроприводы, релейная аппаратура), многие вопросы динамического взаимодействия еще не получили должной детализации представлений, в частности, в теории и практике виброзащиты объектов.

I. Общие положения. Постановка задачи исследования

Активная виброзащитная система (ВЗС) образуется путем введения в исходную систему активной связи, в основу которой положено исполнительное устройство электродинамического типа. Принцип действия этого устройства (рис. 1) аналогичен принципу действия электромеханического преобразователя (ЭМП) или электродинамического вибростенда. На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – подвижная катушка с элементами подвеса k и h; 2 – электромагнит; U – управляющее напряжение; M – масса подвижных частей.

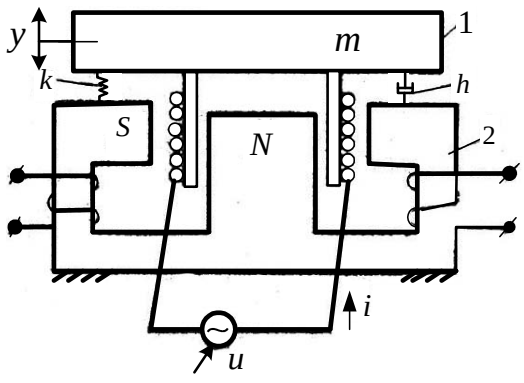


Рис. 1. Принципиальная схема электромеханического преобразователя

В исполнительных устройствах электродинамического типа силы, действующие на исполнительный орган (подвижную катушку), возникают в результате взаимодействия электромагнитного поля в зазоре с полем подвижной катушки. Таким образом, электродинамическая система представ-

ляет собой электромагнит, в поле которого движется подвижная катушка. К подвижной катушке, кроме движущих электромагнитных сил, приложены также силы, противодействующие движению. Они создаются как механическими элементами (например, демпфером и пружиной), так и за счет электромагнитных явлений, связанных с перемещением системы (сила противо ЭДС индукции).

Собственная частота и постоянные времени подвижной системы являются динамическими характеристиками, определяющими особенности реакции электродинамической системы на электрические входные управляющие сигналы и механические возмущения (например, вибрация корпуса). Динамика таких устройств зависит также от ряда других величин: нелинейных характеристик отдельных элементов, вида электрической энергии (напряжение, ток) и т. д.

Для известных из практики конструкций частотный диапазон работы электрических систем находится в границах от 1 до 1000 Гц. Расширение этого диапазона в сторону уменьшения низшей границы или увеличения верхней – связано с преодолением значительных трудностей.

Процессы, происходящие в электродинамических системах, можно описать с помощью дифференциальных уравнений, вывод которых базируется на законе магнитной индукции и принципе Даламбера. Если принять, что потоки рассеяния, краевые проводимости, потери насыщения в стали и т. п. равны нулю, то для электрической цепи можно записать следующее уравнение:

$$L\frac{di}{dt} + Ri = U + Bl\frac{dy}{dt}, \qquad (1)$$

где L – индуктивность подвижной катушки, R – активное сопротивление подвижной катушки, B – магнитная индукция в зазоре, l – длина проводника подвижной катушки, i – ток в цепи подвижной катушки, y – мгновенное перемещение подвижной катушки.

Для равновесия перемещающейся катушки будет справедливо уравнение сил:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} + h\frac{dy}{dt} + ky = -Bli. \qquad (2)$$

В работе [4] показано, что электродинамическая система в высокочастотной области может быть представлена в виде механической системы, изображенной на рис. 2, т. е. при высоких частотах отрабатываемых сигналов необходим учет относительно нежесткой связи между обмоткой подвижной катушки и фланцем крепления нагрузки (m_1 - масса обмотки подвижной катушки; m_2 – масса фланца крепления нагрузки). С учетом этого дифференциального уравнения движения электродинамической системы при $h_1 = h_2 = 0$ будет иметь вид:

$$\begin{aligned} L\frac{di}{dt} + Ri &= U + Bl\frac{dy}{dt}, \\ m_1\frac{d^2y}{dt^2} + k_1y - k_1y_1 &= -Bli, \\ m_2\frac{d^2y_1}{dt^2} + k_2y_1 - k_1y + k_1y_1 &= 0. \end{aligned} \qquad (3)$$

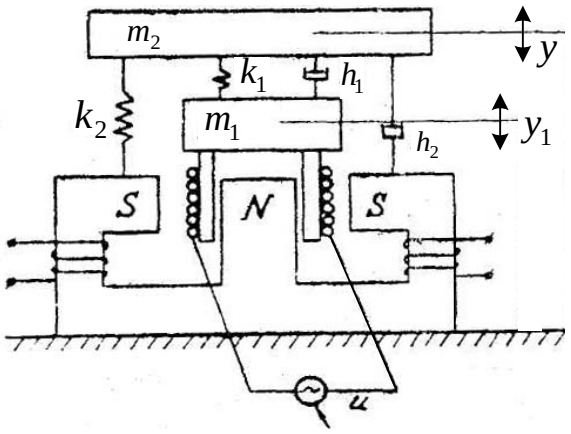


Рис. 2. Принципиальная схема электромеханической колебательной системы

В области низких частот связь между обмоткой подвижной катушки и фланцем может считаться абсолютно жесткой (рис. 1), и движение системы описывается уравнениями (1) и (2). Таким образом, параметры состояния системы и электродинамического устройства связаны между собой, а динамические свойства будут зависеть от конкретных условий взаимодействия элементов.

II. Принципиальная схема, дифференциальные уравнения, структурные схемы и передаточные функции электродинамических ВЗС

При введении в исходную пассивную систему (рис. 1) электродинамических связей для работы в низкочастотной области можно получить активную электродинамическую виброзащитную систему, в которой, изменяя напряжение U (рис. 1), можно получать необходимые эффекты. Такой схеме в соответствие можно поставить схему (рис. 3), где $P(t)$ – управляющая сила, действующая на объект защиты со стороны исполнительного устройства $\left(P(t) = Bli\right)$. Уравнения движения такой системы, в соответствии с принципом виброзащиты и уравнениями (1) и (2), можно записать в виде:

$$m\frac{d^2y}{dt^2}+h\frac{dy}{dt}+ky=kz+h\frac{dz}{dt}-Bli,$$
$$L\frac{di}{dt}+Ri=U+Bl\frac{dy}{dt}, \quad (4)$$

где z – внешнее кинематическое возмущение.

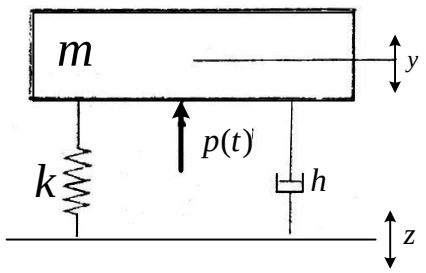


Рис. 3. Принципиальная схема активной виброзащитной системы

Приводя уравнение (4) к операторной форме Лапласа, получим:

$$m\bar{y}p^2+h\bar{y}p+k\bar{y}=k\bar{z}+p\bar{z}h-Bl\bar{i},$$
$$L\bar{i}p+R\bar{i}=\bar{U}+Bl\bar{y}_1p, \quad (5)$$

где p – переменная Лапласа, и построим структурную схему активной электродинамической ВЗС (рис. 4). Напряжение U представляет собой управляющий сигнал, который через исполнительное устройство осуществляет управление колебаниями объекта защиты, и зависит от способа замыкания дополнительной активной цепи, то есть способа управления (место подключения измерительного устройства, параметры блока обработки информации и др.).

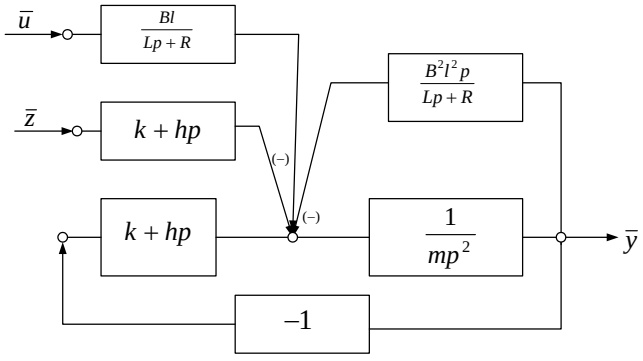


Рис. 4. Структурная схема электродинамической системы

Изменяя напряжение, можно менять параметры виброзащитной системы. Отметим, что система имеет два входных воздействия: кинематическое возмущение – z и воздействие на состояние системы через напряжение u. Это дает возможность построить ряд передаточных функций, например, $W_1(p)=\frac{\bar{y}}{\bar{z}_{(\bar{u}=0)}}$, $W_2(p)=\frac{\bar{y}}{\bar{u}_{(\bar{z}=0)}}$. В общем случае u может быть зависимым [5] от внешнего возмущения z или параметра состояния y, поэтому большое значение имеет способ замыкания цепей между собой. Можно выделить несколько подходов управления, а именно: по абсолютному отклонению объекта защиты y, в зависимости от изменения координаты z (управление по возмущению); по относительному отклонению объекта защиты $y-z$; по сумме координат $y+z$.

Из структурной схемы на рис. 4 следует, что электродинамическая связь реализуется: через дополнительное внешнее воздействие u (с передаточной функцией $W_3(p)=\frac{Bl}{Lp+R}$), а также через дополнительную цепь с передаточной функцией $W_4(p)=\frac{B^2l^2p}{Lp+R}$. Если $u=0$, то $W_2(p)=0$, так как предполагается, что электрическая цепь будет разорвана $(i=0, B=0)$. Для получения активной виброзащитной системы с электродинамическим устройством (ЭДУ) дополнительная цепь с передаточной функцией $W_1(p)$ должна быть превращена в замкнутый контур, входом в который должен стать один из параметров (или несколько) динамического состояния виброзащитной системы. Такая процедура предполагает необходимость выполнения некоторых операций по измерению параметра, обработке информации и усилению сигнала. Каждая из упомянутых операций реализуется своей цепью, имеющей свою передаточную функцию. Передаточная функция всей цепи может быть получена произведением передаточных функций составляющих цепей [9]. Передаточная функция измерительной цепи может быть представлена передаточной функцией колебательного звена. Усилитель сигнала на малых частотах можно представить эквивалентной пружиной с жесткостью, равной коэффициенту усиления. Передаточная функция цепи обработки сигнала формируется в зависимости от выбранного закона управления свойствами виброзащитной системы. Будем полагать, что на предварительном этапе передаточная функция цепи для формирования управляющего воздействия может быть представлена передаточной функцией апериодического звена:

$$W_{упр}(p)=\frac{ap+b}{a_1p+b_1}, \quad (6)$$

где a, b, a_1, b_1 – коэффициенты, зависящие от параметров измерительной цепи, закона управления и параметров усилительного устройства.

III. Возможные виды замыкания управляющей цепи

Будем полагать, что напряжение u зависит от координаты y объекта защиты, тогда структурная схема ВЗС примет вид, как показано на рис. 5.

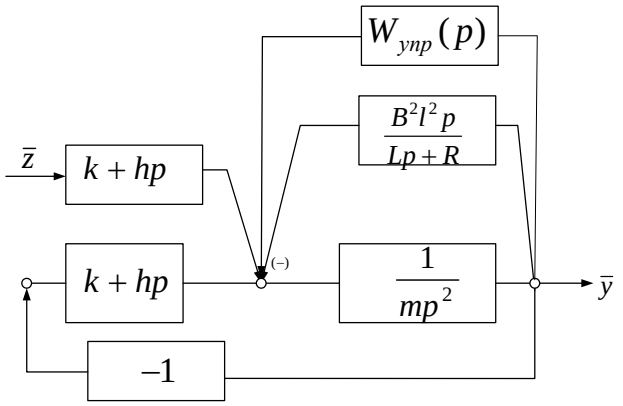


Рис. 5. Структурная схема ВЗС со связью по абсолютному отклонению

Передаточная функция системы в этом случае примет вид:

$$W_{абс}(p)=\frac{k+hp}{mp^2+hp+k\mp W_{упр}(p)+\frac{B^2l^2p^2}{Lp+R}}. \quad (7)$$

где $W_{упр}(p)$ записано таким образом, что позволяет учесть особенности положительной и отрицательной обратной связи. Как было отмечено выше, структура цепи $W_{упр}(p)$ содержит передаточные функции $W_3(p)=\frac{Bl}{Lp+R}$, а также передаточные функции измерительной, усилительной цепей и устройства обработки информации. В первом приближении, $W_{упр}(p)$ определяется выражением (6).

При замыкании цепи формирования напряжения u на координату относительного движения $(\bar{y}-\bar{z})$ получим передаточную функцию

$$W_{отн}(p)=\frac{k+kp\pm W_{упр}(p)}{mp^2+hp+k\pm W_{упр}(p)+\frac{B^2l_2^2p}{Lp+R}}. \quad (8)$$

Если при управлении по абсолютному отклонению y передаточная функция управляющей цепи входила только в знаменатель (7), то в (8) эта функция входит и в числитель.

Если цепь формирования управляющей силы замыкается на параметры вибрации основания z, то передаточная функция ВЗС примет вид, как показано на рис. 6.

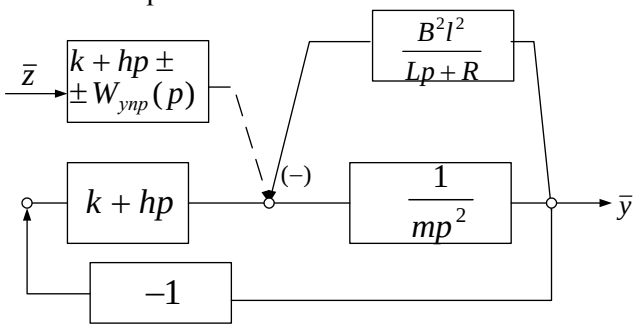


Рис. 6. Структурная схема ВЗС с управлением по возмущению

Передаточная функция системы (рис. 6) определится выражением

$$W_{возм}(p)=\frac{\bar{y}}{\bar{z}}=\frac{k+hp\pm W_{упр}(p)}{mp^2+hp+k+\frac{B^2l^2p}{Lp+R}}. \quad (9)$$

Случай управления по возмущению интересен тем, что передаточная функция цепи формирования управляющей силы входит только в числитель. Это обстоятельство предопределяет некоторые особенности в построении управления состоянием, что нашло отражение в развитии теории обратной связи [10].

Развивая предложенный подход, можно ввести в рассмотрение и более сложные комбинации соотношения координат, что может найти применение при построении виброзащитных систем, обладающих специфичными особенностями.

Что касается цепи $W_4(p)=\frac{B^2l^2p}{Lp+R}$ (рис. 5, 6), то в физическом смысле, они представляет собой некоторую дополнительную пружину, жесткость которой зависит от частоты внешнего воздействия: при $p\to 0$ – жесткость также стремится к 0; при $p\to\infty$ жесткость $\to\frac{B^2l^2}{L}$. Таким образом, формирование в колебательной структуре виброзащитной системы с помощью ЭДУ противо ЭДС индукции соответствует введению дополнительного упругого элемента между объектом защиты и неподвижной основой системы. Такого рода звенья виброзащитной системы можно рассматривать как разновидности так называемых обобщенных пружин, рассмотренных в работах [6], [7]. Дополнительная цепь $W_{упр}(p)$, в которую входит устройство с передаточной функцией

$W_2(p) = \dfrac{Bl}{Lp + R}$ (а также других: измерение, обработка сигнала, усиление), может быть отнесена к структуре активной цепи виброзащитной системы. При рассмотрении диапазона высоких частот отработки сигналов для электродинамических исполнительных устройств, как указано выше, необходим учет нежесткости связи между обмоткой подвижной катушки и фланцем крепления нагрузки. Расчетная схема активной электродинамической ВЗС может быть приведена к виду, показанному на рис. 7, где обозначено: m_1 – масса обмотки подвижной катушки, m_2 – масса объекта защиты и фланца крепления.

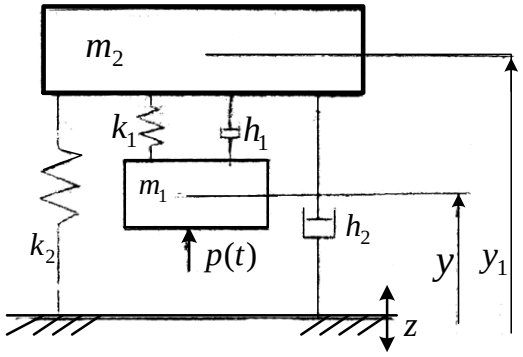


Рис. 7. Принципиальная схема для учета упругих свойств обмотки катушек

Дифференциальные уравнения движения системы (рис. 7) имеют вид:

$$L\frac{di}{dt} + Ri = U + Bl\frac{d}{dt}(y - z), \quad (10)$$

$$m_1\frac{d^2y}{dt^2} + h_1\frac{dy}{dt} + k_1 y = k_1 y_1 + h_1\frac{dy_1}{dt} - Bli, \quad (11)$$

$$m_2\frac{d^2y_1}{dt^2} + h_2\frac{dy_1}{dt} + k_2 y_1 = k_1 y + h_1\frac{dy}{dt} - k_1 y_1 - h_1\frac{dy_1}{dt} + k_2 z + h_2\frac{dz}{dt}. \quad (12)$$

Учет упругости обмотки катушки существенно усложняет схему взаимодействия даже в системе с двумя степенями свободы. Для оценки влияния электродинамических связей можно, как это было показано выше, выбрать параметры состояния, по которым ведется контроль, и сделать замыкание цепи формирования напряжения u, а затем построить передаточные функции системы «вход – z» – «выход – y». Для упрощения определения реакции системы на внешнее возмущение z, которое осуществляется по двум каналам (на m_1 и m_2) можно воспользоваться формулами Крамера [11]. Если объект защиты имеет нежесткое крепление к исполнительному устройству, то в этом случае расчетная схема активной электродинамической системы виброзащиты принимает вид, показанный на рис. 8 *а, б* (обозначения: m_1 – масса обмотки подвижной катушки, m_2 – масса фланца крепления объекта защиты, m_3 – масса объекта защиты).

Дифференциальные уравнения движения данной системы (для упрощения примем $h_1 = h_2 = h_3 = 0$) могут быть представлены в виде:

$$\left.\begin{aligned} &L\frac{di}{dt} + Ri = U + Bl\frac{d}{dt}(y_1 - z),\\ &m_1\frac{d^2y}{dt^2} + k_1 y - k_1 y_1 = -Bli,\\ &m_2\frac{d^2y_1}{dt^2} + k_2 y_1 - k_1 y - k_3 y_2 +\\ &+ k_1 y_1 = 0, m_3\frac{d^2y_2}{dt^2} + k_3 y_2 - k_3 y_1 = k_3 z. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

а) б)

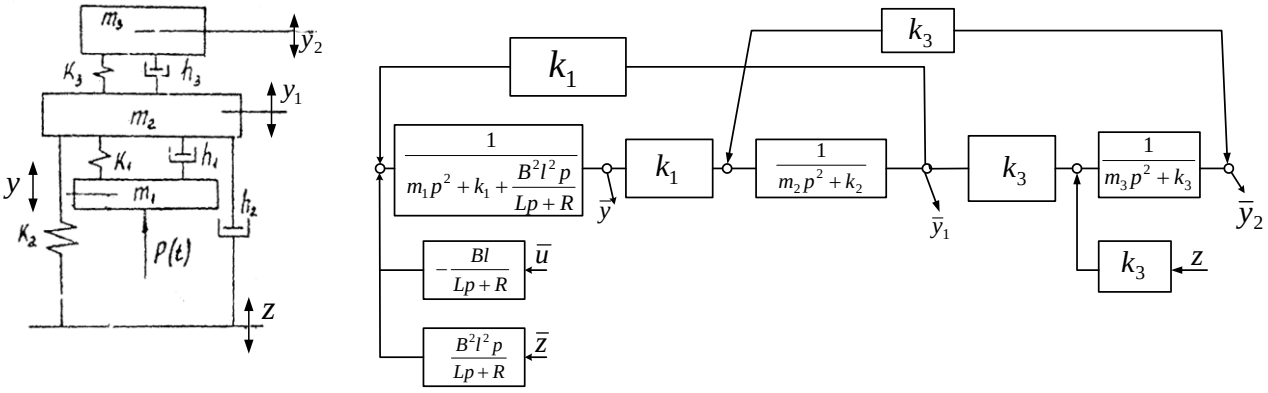


Рис. 8. Расчетная (а) и структурная (б) схемы виброзащитной системы с ЭДУ с учетом нежесткости крепления устройства с объектом

На рис. 8, *б* изображена структурная схема активной электродинамической ВЗС, соответствующая расчетной схеме на рис. 8, *а*. Из структурной схемы (рис. 8, *б*) следует, что в качестве входных сигналов надо принять во внимание три: два – связаны с вибрацией основания, а третий – связан с цепью формирования управляющей силы. Используя приемы, аналогичные вышеприведенным, можно получить передаточные функции системы по отношению к объекту защиты m, а также отдельным фрагментам активной виброзащитной системы (m_2 и m_3).

IV. Виброзащитная система с электродинамическим гасителем

Если в рассмотренных выше системах сигнал управления напряжением u принять равным нулю (что соответствует. например, разрыву активной динамической цепи), то при замкнутости электрического контура имеет смысл рассмотреть систему с гасителем электродинамического типа. В этих схемах энергия колебаний системы превращается в электрическую энергию и рассеивается сопротивлением. Такие системы можно рассматривать и как активные системы частного вида. В зависимости от способа закрепления элементов электромагнитной катушки можно реализовать способ управления по абсолютному или относительному отклонению объекта защиты (рис. 2). При закреплении по схеме (рис. 3) имеет место управление по абсолютному отклонению. При этом передаточная функция дополнительной цепи совпадает с передаточной функцией апериодического звена первого порядка общего вида. Передаточная функция виброзащитной системы имеет вид:

$$W(p)=\frac{p^2Lh+p(Rh+Lk)+Rk}{p^3Lm+p^2(Rm+hL)+p(kl+Rh+B^2l^2)+kR}. \quad (14)$$

При закреплении исполнительного элемента по схеме (рис. 2) в числителе передаточной функции (14) добавляется член B^2l^2p. Условие устойчивости системы может быть записано следующим образом:

$$L^2kh+L(kRm+Rh^2+B^2l^2h)+ \\ +B^2l^2Rm+R^2mh-kLRm>0, \quad (15)$$

откуда следует, что система устойчива при любом выборе параметров. При управлении по абсолютному отклонению условие эффективной работы можно представить в форме:

$$-Lmh^2B^2l^2\omega^6+\omega^4(-2Lmk^2B^2l^2+ \\ +2h^2kLB^2l^2+h^2B^4l^4)+(\omega^2h^2k^2R^2+ \\ +2k^3LB^2l^2+2k^2RhB^2l^2+k^2B^4l^4)>0 \quad (16)$$

или при $h=0$:

$$\omega^2(-2Lmk^2B^2l^2)+2k^3LB^2l^2+k^2B^4l^4>0. \quad (17)$$

Из (17) можно получить значение частот, в пределах которых осуществляется эффективная защита

$$\omega_{абс}<\sqrt{\frac{k}{m}+\frac{B^2l^2}{zLm}}. \quad (18)$$

В свою очередь, (16) может быть представлено в виде неравенства:

$$-Az^2\pm Bz+C>0, \quad (19)$$

(где $z=\omega^2$). При управлении по относительному смещению условие эффективной работы запишется:

$$\omega^6(-2Lmh^2B^2l^2-2Rhm^2B^2l^2- \\ -2Lkm^2B^2l^2-m^2B^4l^4)+\omega^4(2k^2mLB^2l^2+ \\ +4kmRhB^2l^2+2kmB^4l^4)+\omega^2h^2k^2R^2>0, \quad (20)$$

а при $h=0$ соответственно

$$\omega^2(-2Lmk^2B^2l^2-m^2B^4l^4)+ \\ +2k^2LB^2l^2+2kmB^4l^4>0. \quad (21)$$

Из (21) могут быть найдены границы эффективной виброзащиты

$$\omega_{отн}<\sqrt{\frac{2k(kL+B^2l^2)}{m(2Lk+B^2l^2)}}. \quad (22)$$

Анализ (16) и (20) показывает, что при использовании электродинамического гасителя возможен выигрыш в области низких частот по сравнению с пассивной системой. При этом резонансная частота системы смещается в область более высоких частот. Вместе с тем, даже при отсутствии демпфирования, резонанс в системе за счет введения дополнительной связи ограничен по величине. Вводя параметр

$$\gamma=\frac{L}{B^2l^2}, \quad (23)$$

преобразуем (18) и (22) к виду

$$\omega_a<\sqrt{\frac{k}{m}+\frac{1}{2\gamma m}}, \quad (24)$$

$$\omega_{отн}<\sqrt{\frac{2k(k\gamma+1)}{m(2K\gamma+1)}}. \quad (25)$$

При увеличении $\gamma, \omega_a\to\omega_0$, а $\omega_{отн}\to\omega_0$ (здесь $\omega_0=\sqrt{\frac{k}{m}}$). При уменьшении $\gamma, \omega_a\to\omega_0$, тогда как $\omega_{отн}\to\sqrt{2\omega_0}$. Анализ (24) и (25) показывает, что $\omega_a>\omega_{отн}$ при любых значениях γ; относительно учета сил демпфирования, можно отметить, что последние приводят к некоторому расширению зоны эффективной работы.

Анализ показывает, что варьируя электрическими параметрами электрической схемы (ин-

дуктивность, сопротивление и др.), можно существенно менять свойства системы.

V. Анализ эффективности активных электродинамических ВЗС

Рассмотрим активную электродинамическую ВЗС с регулированием по абсолютному отклонению (рис. 5) при различных зонах управления, то есть при различных передаточных функциях дополнительной электродинамической связи $W_{упр}(p)$. Ограничимся простейшими случаями:

1. $W_{упр}(p)=a$; условие эффективной работы –

$$\begin{aligned}&a^2R^2+2akR^2+(B^4l^4+2alB^2L^2+\\&+a^2LB^2l^2+a^2L^2+2aLB^2l^2+\\&+2akL^2+2hRB^2l^2-2amR^2)\omega^2-\\&-2mL(aL+B^2l^2)\omega^4>0.\end{aligned} \quad (26)$$

2. $W_{упр}(p)=\dfrac{a}{T_2p}$; условие эффективной работы –

$$\begin{aligned}&a^2R^2+(2a^2L^2-2ahR^2T_2-2aRB^2l^2T_2)\omega^2+\\&+(B^4l^4T_2+2kLB^2l^2T_2+2hRB^2l^2T_2-\\&-2ahL^2)T_2\omega^4-2mLB^2l^2T_2^2\omega^6>0.\end{aligned} \quad (27)$$

3. $W_{упр}(p)=aT_1p$; условие эффективной работы –

$$\begin{aligned}&a^2R^2T_1^2+2ahR^2T_1+B^2l^2(B^2l^2+2kL+\\&+2hR+2aRT_1)+(a^2L^2T_1^2+2ahL^2T_1-\\&-2mLB^2l^2)\omega^2>0.\end{aligned} \quad (28)$$

4. $W_{упр}(p)=\dfrac{a}{T_2p}$; условие эффективной работы –

$$\begin{aligned}&R^2(k+a)^2+(h^2R^2-2kR^2m+k^2L^2-\\&-2kRB^2l^2T_2-2aR^2hT_2-2aRB^2l^2T_2-\\&-2aR^2m+a^2l^2+2hRB^2l^2+2akL^2+\\&+2kLB^2l^2+2kRB^2l^2+2aLB^2l^2+\\&+B^4l^4)\omega^2+(h^2l^2+m^2R^2-2kmL^2-\\&-4aRmLT_2+2hRB^2l^2T_2^2+\\&+2kLB^2l^2T_2^2+2amL^2+B^4l^4T_2^2-\\&-4kLRT_2-2ahL^2T_2-\\&-2mLB^2l^2)\omega^4-2mLB^2l^2\omega^6>0.\end{aligned} \quad (29)$$

Как можно отметить, неравенства, являющиеся условиями эффективной работы при усложнении $W_{доп}(p)$, становятся громоздкими. Такие выражения, как (29), обычными методами анализировать уже достаточно трудно, поэтому целесообразно применять метод графических исследований условий эффективной работы.

Графический метод заключается в определении зависимости, вида и положений кривой, соответствующей условию эффективной работы, от знака и относительного значения коэффициентов неравенств [8]. Например, для условия эффективной работы (29), переписанного в общем виде:

$$Az^3+Bz^2+Cz+D>0 \quad (z=\omega^2). \quad (30)$$

Метод графических исследований применим для неравенств до 4-й степени включительно. При степени выше 4-й графическое отображение затруднено, а также значительно возрастает число возможных комбинаций коэффициентов.

Таким образом, исследование условий эффективной работы с помощью графических построений дает возможность выбирать значения параметров ВЗС без аналитического решения неравенств эффективной работы (низкие, высокие частоты или набор частотных интервалов), можно определить знаки и относительные значения коэффициентов неравенства, определяющего условие эффективной работы для системы данного вида. Может решаться и обратная задача. При данных параметрах активной ВЗС по коэффициентам неравенства можно определять расположение области частот, при которых введение активной связи оказывает положительный эффект.

VI. Вопросы устойчивости активных электродинамических ВЗС

Так как активные электродинамические ВЗС являются, по-существу, системами автоматического управления, то для них необходима проверка на устойчивость. Проверка на устойчивость предусматривает нахождение ограничений на значение параметров системы, которые носят название критериев устойчивости. Поскольку в данном случае нас интересуют системы невысокого порядка, то целесообразно использовать критерии Рауса-Гурвица [9].

Критерии устойчивости находятся для каждой исследуемой системы отдельно. Запишем условия устойчивой работы для рассмотрения ранее активной электродинамической ВЗС с регулированием по абсолютному отклонению при различных $W_{упр}(p)$:

1. $W_{упр}(p)=a$; условия устойчивости –

$$(hL+mR)(Lk+Rh+B^2l^2)-mL(kR+Bla)>0; \quad (31)$$

2. $W_{упр}(p)=\dfrac{a}{T_2p}$; условия устойчивости –

$$\begin{aligned}&kR^2T^3{}_2[(hL+mR)(kL+hR+B^21^2)-kRLm]-\\&-BlaT_2^2(hL+mR)^2>0;\end{aligned} \quad (32)$$

3. $W_{упр}(p)=aT_1p$; условие устойчивости –

$$(hL+mR)(Lk+Rh+B^2!^2+aT_1Bl)-mLkR>0; \quad (33)$$

4. $W_{упр}(p)=\dfrac{a}{T_2p}$; условие устойчивости –

$$\begin{aligned}&(kL+kRT_2+hR+B^2l^2)[(hT_2L+Lm+\\&+mRT_2)(kT_2L+Lh+hRT_2+Rm+T_2B^2l^2)-\\&-(kL+kRT_2+hR+B^2l^2)mT_2L]-\\&-(kR+Bla)(hT_2L+Lm+mRT_2)^2>0.\end{aligned} \quad (34)$$

Специфика исследования активных ВЗС (необходимость учета двух ограничений: условия устойчивой и эффективной работы), требует определенного порядка проведения исследова-

ний. Предлагается начинать с исследования условий устойчивой работы, а потом переходить к неравенству эффективной работы. Это в значительной мере сокращает объем вычислений.

Заключение

Введение электродинамических связей существенным образом изменяет структуру системы и изменяет ее динамические свойства. Важным обстоятельством является то, что цепь для формирования управляющей силы через соответствующее напряжение в цепи, позволяет реализовать несколько принципов управления по параметрам состояния системы: по абсолютному, относительному отклонениям и по возмущению. В первом приближении дополнительная цепь, отражающая свойства электродинамической связи может быть рассмотрена с применением передаточной функции апериодического звена общего вида.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Рычажные связи и рычажные механизмы в механических колебательных системах // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. № 4(24). – Иркутск: - ИрГУПС. 2009. С. 97–102.
2. Елисеев С.В., Хоменко А.П., Логунов А.С. Использование в системах пневматической защиты механизмов или устройств для преобразования движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Вып. № 1(25). – Иркутск: – ИрГУПС. 2010. С. 8–13.
3. Елисеев С.В., Хоменко А.П., Резник Ю.Н. Активные виброзащитные системы. Вопросы наблюдаемости и управляемости // Збірник наукових праць. Вып. № 3(25). Том 1. Полтава: Полтавский национальный технический университет. 2009. С. 98–109.
4. Божко А.Е., Розин И.В. Принципы построения активных виброзащитных электродинамических систем // Проблемы машиностроения. Вып. 7. М.: 1978. С. 41–46.
5. Елисеев С.В., Лонцих П.А. Влияние управляющей силы в структуре внешних возмущений // Вестник Иркутского гос. технического университета. – Вып. № 1(11). – Иркутск. 2011. С. 26–33.
6. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. – Иркутск: Изд-во Ирк. гос. ун-та, 2008. – 523 с.
7. Елисеев С.В., Упырь Р.Ю. Мехатроника виброзащитных систем. Структурные подходы // Вестник Белорусского гос. университета транспорта / Наука и транспорт. №2. – Гомель. 2010. С. 112–119.
8. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. – Новосибирск: Наука. 1978. – 242 с.
9. Коловский М.З. Автоматическое управление виброзащитными системами. – Ленинград: Изд-во Машиностроение. – 1978. – 298 с.
10. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи. Управление при неопределенности. – Москва: Наука. Физматгиз. 1997. – 352 с.
11. Дружинский И.А. Механические цепи. – Ленинград: Изд-во Машиностроение. 1978. – 242 с.

УДК 621.002.5

Шиляев Андрей Иванович,
аспирант, Воткинский филиал ФГБОУ ВПО «ИжГТУ»,
тел.: +7 (34145) 4-78-11, E-mail: market@udm.net

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ВЫТЯГИВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ НИТЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОЛОКНА ИЗ БАЗАЛЬТОВОГО СЫРЬЯ ДУПЛЕКС-СПОСОБОМ

A.I. Shilyaev

DEFINITION OF RATIONAL CONDITIONS MAKING THE FIBRE FROM PRIMARY THREADS FROM BASALT MINERAL RAW MATERIALS IN DOUBLEX PROCESS

Аннотация. *Рассмотрены теоретические исследования процессов образования неволокнистых включений на установках, производящих минеральное (базальтовое) волокно дуплекс-способом. Определение рациональных условий для вытягивания первичных нитей позволяет уменьшить влияние технических недостатков оборудования на процесс образования неволокнистых включений (корольков), который характеризуется ухудшением качественных и физических показателей материалов из базальтового сырья.*

Ключевые слова: *неволокнистые включения, корольки, качество минерального (базальтового) волокна.*

Abstract. The w*ork is devoted to consideration of theoretical research of processes of formation of nonfibrous inclusions on installations making a mineral (basalt) fibre in a duplex way. Definition of rational conditions for primary threads extension allows to reduce influence of technical lacks of the equipment on process of formation of nonfibrous inclusions characterised by deterioration of qualitative and physical indicators of materials from basalt raw materials.*

Keywords: *nonfibrous inclusions, quality of mineral raw materials.*

В основу методики теоретического исследования процессов образования неволокнистых включений положено рассмотрение физических закономерностей образования вторичных капель расплавленного базальта в зоне действия газового потока на первичные базальтовые нити.

Технические недостатки оборудования для получения базальтового волокна дуплексным способом и их связи с различными типами неволокнистых включений показаны на рис. 1. Одним из недостатков является неравномерность распределения первичных нитей по длине щелевого сопла раздува. Предусмотренный на действующей установке резьбовой вал, во впадины которого должны входить нити и обеспечивать таким образом равномерность их расположения, неэффективен. Близкое расположение нитей приводит к их слипанию, энергии газового потока становится недостаточно для их плавления и расщепления, поэтому образуются каплеобразные бесформенные включения. Неравномерный износ сопла раздува приводит к неравномерности параметров потока по длине сопла и неравенству условий волокнообразования для нитей. Отсутствие совершенных средств контроля параметров технологического процесса не позволяет в нужный момент корректировать процесс, а также приводит к образованию включений. Устранение этих и других недостатков, указанных на рис. 4, возможно после теоретического и экспериментального исследования каждой из причин образования неволокнистых включений.

Одной из причин образования неволокнистых включений в базальтовом волокне, получаемом дуплексным способом, является нестабильность диаметра первичной нити расплава, вытягиваемой из фильерного питателя. В.Л. Колпащиков [1] указывал на то, что важнейшим параметром, влияющим на устойчивость процесса вытягивания стеклянного волокна, являющегося аналогом первичных нитей расплавленного базальта, является скоростной коэффициент, определяемый как отношение скорости вытягивания волокна $V_н$ к скорости подачи расплавленной массы, а в данном случае – к скорости самопроизвольного истечения расплава базальта через фильеру $V_ф$. При получении стеклянного волокна этот коэффициент составляет порядка 20, однако при получении первичной базальтовой нити его значение может быть другим. В работе [2] это объясняется тем, что при

потере устойчивости процесс вытяжки переходит в автоколебательный режим, при котором диаметр нити может существенно отличаться от заданного. Это явление, называемое «вытяжным резонансом», было обнаружено как теоретически, так и экспериментально. Расчетная схема приведена на рис. 1. Условие отсутствия вытяжного резонанса при получении первичной базальтовой нити получено в виде

$$1{,}17 > 3\ln (V_н/ V_ф)R_ф^{\,2} /(8L_п l_ф) > 0{,}86 , \quad (1)$$

где $L_п$ – длина зоны деформации первичной нити при выходе ее из фильерного питателя, которая определяется из рассмотрения задачи уменьшения температуры нити при ее охлаждении или экспериментально, м; $l_ф$ и $R_ф$ – длина и радиус фильеры, м.

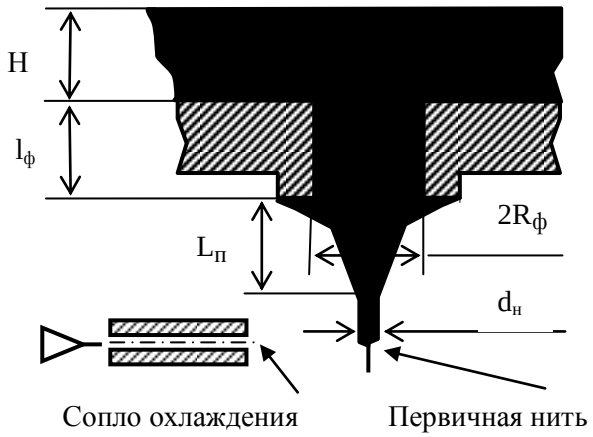


Рис. 1. Расчетная схема образования первичных базальтовых нитей

Обозначим среднюю часть выражения (1) через Ψ и присвоим ему определение «параметр стабильности нити»:

$$\Psi = 3\ln (V_н/ V_ф)R_ф^{\,2} /(8L_п l_ф). \quad (2)$$

Скорость самопроизвольного истечения расплава через фильеру может быть определена из формулы Пуазейля [3], по которой, предположив, что свойства расплава базальта остаются неизменными по длине фильеры, объемный расход расплава как вязкой несжимаемой жидкости без учета условий входа и выхода струи из фильеры можно определить по формуле

$$Q = i\pi R_ф^{\,4} /8\mu, \quad (3)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости расплава; i – градиент давления на длине фильеры, определяемый выражением:

$$i = \rho_б g H/l_ф, \quad (4)$$

где H – гидростатический напор, или уровень расплава над фильерой, м.

Скорость истечения определяется как отношение расхода к площади сечения фильеры:

$$V_ф = \rho_б g\, HR_ф^{\,2} /8\mu_б l_ф, \quad (5)$$

где $\mu_б$ = 14,9 Па·с – динамическая вязкость расплава базальта.

Подставив в (2) значение скорости истечения расплава, параметр стабильности нити получим в виде

$$\Psi = 3\ln (8\mu_б\, l_ф V_н/\rho_б g\, HR_ф^{\,2})R_ф^{\,2} /(8L_п l_ф). \quad (6)$$

Рассматривая совместно (1) и (6) определим такие значения длины зоны деформирования первичной нити расплава, при которых не будет происходить вытяжного резонанса и диаметр нити будет постоянным:

$$L_{пmin} = 0{,}32\ln (8\mu_б\, l_ф\, V_н/\rho_б g\, HR_ф^{\,2})R_ф^{\,2}/l_ф , \quad (7)$$

$$L_{пmax} = 0{,}436\ln (8\mu_б\, l_ф\, V_н/\rho_б g\, HR_ф^{\,2})R_ф^{\,2}/l_ф . \quad (8)$$

Область рациональных значений длины зоны деформирования первичной нити, определенная выражениями (7) и (8) в зависимости от скорости вытягивания нити, показана на рис. 2.

Графики построены для одного из сочетаний параметров, при которых проводились эксперименты:

$\rho_б$=2700 кг/м^3 , H=0,015 м, $R_ф$=0,0011м, $l_ф$=0,007 м.

На рис. 3 показаны графики зависимости параметра стабильности нити Ψ от уровня расплава базальта при близких к рациональной скоростях вытягивания нитей:

$V_н$ = 0,08 м/с, 0,1 м/с и 0,12 м/с,
при $R_ф$ = 0,0011м, $l_ф$ = 0,007 м.

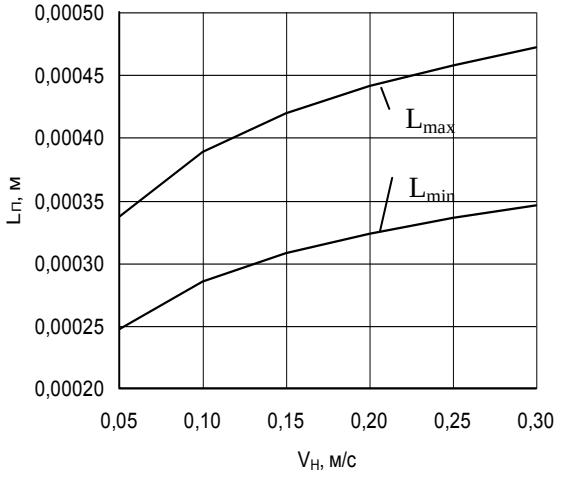


Рис. 2. Область рациональных значений длины зоны деформирования первичной нити при H = 0,015 м, $R_ф$ = 0,0011 м, $l_ф$ = 0,007 м

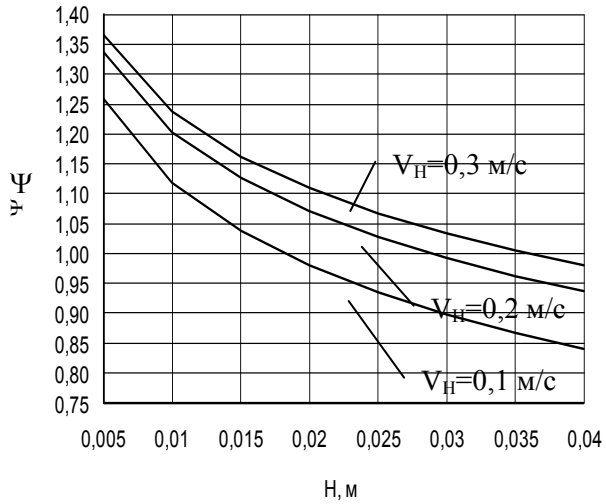


Рис. 3. Зависимости параметра стабильности нити Ψ от уровня расплава базальта H, при $R_ф$=0,0011 м, $l_ф$=0,007 м

и определенной для этих параметров средней длине зоны деформирования нити $L_п = (L_{пmin} + L_{пmax})/2$.

Анализируя полученные зависимости и графики, можем сделать вывод, что при увеличении скорости вытягивания длина зоны деформирования нитей увеличивается, а разность ее предельных значений изменяется несущественно. Параметр стабильности процесса вытягивания уменьшается при увеличении уровня расплава базальта над фильерой и не зависит от скорости вытягивания нитей.

Рациональную длину зоны деформирования первичной нити, при которой не будет происходить вытяжного резонанса, можно обеспечить путем охлаждения первичной нити сразу после выхода ее из фильерного питателя потоком сжатого воздуха. Требуемый для этого расход воздуха может быть определен при решении уравнения теплового баланса нити по методике из учебника по термодинамике [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колпащиков В. Л., Ланин Ю. И., Мартыненко О. Г., Шнип А. И. О возможности расширения области устойчивости процесса вытяжки волокон. – ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 1. – С. 26–33.
2. Асланова М. С. Стеклянные волокна. – М. : Металлургия, 1983. – 296 с., ил.
3. Кухлинг Х. Справочник по физике : пер с нем. – М. : Мир, 1982. – 520 с., ил.
4. Корниенко О. П. Средняя теплоотдача при обтекании цилиндра поперечным потоком воздуха. – ИФЖ. – 1990. – Т. 59, № 4. – С. 648–649.

Рис. 4. Влияние конструктивных недостатков технологического оборудования на образование неволокнистых включений

УДК 621

Рожкова Елена Александровна,
аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения,
ассистент кафедры «ВиВХ» ЗабИЖТ, тел.: 89243846617, e-mail: helenuys@rambler.ru
Ильиных Виктор Анатольевич,
к.т.н., доцент, зав. кафедрой «ПМиИГ» ЗабИЖТ,
тел: 89144555640

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РК-3-ПРОФИЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

E.A. Rozhkova, V.A. Iliinyh

SAMPLE FABRICATION AND EXPERIMENTAL STAND DEVELOPMENT FOR TESTING RK-3 PROFILE JOIN TOUGHNESS

Аннотация. *Одной из основных задач данной работы является проведение натурных экспериментальных исследований РК-профильных соединений с гарантированным натягом на прочность.*

Ключевые слова: *РК-профильный вал, эксперимент, натяг.*

Abstract. *One of the primary tasks given work is an undertaking натурных experimental study RK-profile of the join with guaranteed difference diameter on toughness.*

Keywords: *RK-profile gross, experiment, difference diameter.*

В лаборатории Мосстанкина (МГТУ) «Технология машиностроения» с помощью способа разработанного профессором д. т. н. А.И. Тимченко были изготовлены образцы РК-3-профильных валов [2]. Изготовление профильных валов осуществлялось в два этапа: сначала из круглой заготовки при черновом точении с использованием стандартного резца получается так называемый синусоидальный контур, не обладающий свойством равноосности; а затем при чистовом точении синусоидального контура безвершинным косоугольным (бреющим) резцом формируется РК-профиль (равноосный контур) (рис. 1).

Для каждого моментопередающего соединения предусмотрена своя посадка, т. е. характер соединения сопрягаемых деталей, определяемый зазором или натягом, а именно разностью их диаметральных размеров до сборки в соответствии с назначенным допуском. Как известно посадки с гарантированным натягом применяют для получения неподвижных неразъёмных соединений, причём относительная неподвижность сопрягаемых деталей обеспечивается благодаря упругим деформациям, возникающим при соединении вала с отверстием ступицы. При этом наибольший предельный диаметральный размер отверстия меньше наименьшего предельного диаметрального размера вала или равен ему [1].

Рис. 1. Образцы РК-профильных валов

Одной из основных задач работы является определение посадки с натягом в профильных соединениях типа РК. С этой целью в лаборатории ЧитГУ были проведены измерения трех ранее изготовленных образцов РК-профильных валов. Для выполнения измерений вал закреплялся в центрах оптической делительной головки модели ОДГ-10 (рис. 2), которая позволяет отсчитывать угловые величины поворота вала.

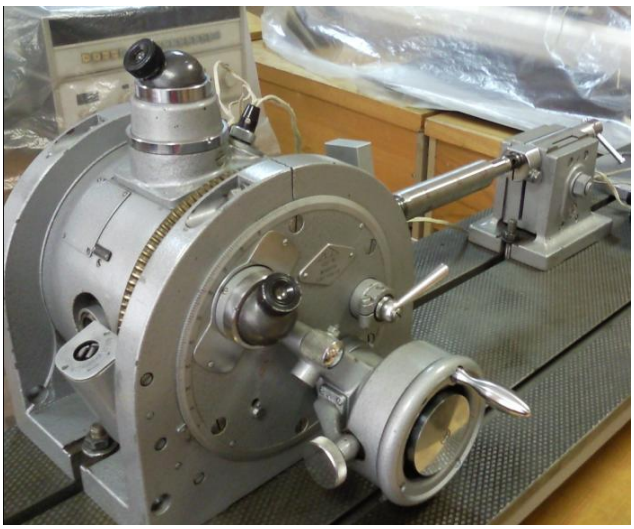


Рис. 2. Оптическая делительная головка модели ОДГ-10

Измерения выполнялись микрометром рычажным МР-50 с точностью 2 мкм. Микрометр имеет подвижный измерительный наконечник и встроенную индикаторную головку. Отклонения размера считывались по индикаторной головке после определения номинального диаметрального размера на микрометрической головке. Принцип работы прибора заключался в перемещении микровинта поворотом в неподвижной гайке. Обороты отсчитывались по шкале стебля прибора, доли оборота отсчитывались по шкале барабана. Показания прибора определялись следующим образом. По шкале стебля определялся штрих, ближайший к торцу барабана; по шкале барабана находился штрих, ближайший к штриху стебля; сумма этих значений определила размер детали. Измеряемый образец РК-профильного вала зажимался между пяткой скобы и микрометрическим винтом. По стрелочному индикатору определились отклонения диаметрального размера вала от номинального размера (рис. 3).

Рис. 3. Измерение вала микрометром модели МР-50

В результате измерения были получены следующие диаметральные размеры по длине вала (табл. 1).

Таблица 1

Числовые текущие размеры среднего диаметра вала, мм

Угол, град.	1 вал	2 вал	3 вал
0	32,912	32,896	32,866
	32,910	32,870	32,866
	32,908	32,868	32,866
	32,904	32,868	32,861
	32,900	32,866	32,861
120	32,904	32,888	32,900
	32,900	32,886	32,906
	32,898	32,886	32,900
	32,894	32,884	32,898
	32,890	32,898	32,892
240	32,902	32,898	32,894
	32,898	32,900	32,900
	32,918	32,892	32,896
	32,900	32,892	32,902
	32,890	32,908	32,900

В результате измерений номинальный средний диаметр РК-профильного вала составил 32,88 мм. Предельные отклонения для первого вала составили $32{,}88^{+0{,}032}_{0}$ мм, что соответствует квалитету p6. Для второго вала – $32{,}88^{+0{,}028}_{-0{,}014}$ мм, что соответствует квалитету p6 и r6. И, соответственно, для третьего вала – $32{,}88^{+0{,}026}_{-0{,}019}$ мм, что соответствует квалитету r6 и s6. Таким образом, отклонения для РК-профильного отверстия должны составить $32{,}88^{+0{,}025}_{0}$ мм в системе отверстия. Данные размеры соответствуют следующим посадкам с натягом $\frac{H7}{p6}$, $\frac{H7}{r6}$, $\frac{H7}{s6}$ в системе отверстия [3].

Дальнейшей задачей исследований является проведение натурных экспериментальных испытаний РК-профильных соединений с гарантированным натягом на прочность. Для решения данной задачи было разработано и изготовлено в ДКТБ Забайкальской железной дороги нагрузочное устройство для испытания РК-3-профильного соединения с натягом (рис. 4). Данное устройство предназначено для реализации различных схем нагружения.

Нагрузочное устройство состоит из плиты, на которую при помощи болтов устанавливаются две стойки. К стойкам прикрепляются две штанги с роликами; четырьмя Г-образными прихватами прикрепляется ступица с РК-профильным отверстием. Нагрузка на образец в виде крутящего момента создается с помощью грузов, которые устанавливают на гиревой подвес.

Используя данное нагрузочное приспособление и электронный измеритель деформации ИД-70 (рис. 5), с помощью способа тензометрии можно проводить экспериментальные исследования образцов РК-профильных соединений на прочность.

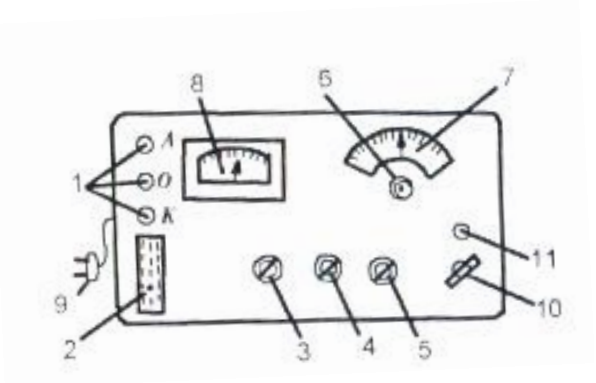


Рис. 5. Измеритель деформаций:
1 – клеммы для подключения датчиков; 2 – колодки для подключения группы датчиков; 3 – переключатель датчиков; 4, 5 – переключатели грубой балансировки моста; 6 – ручка реохорда; 7 – шкала реохорда; 8 – гальванометр; 9 – шнур; 10 –выключатель питания; 11 – предохранитель

Шкала прибора ИД-70 проградуирована в единицах относительной деформации, цена деления не зависит от омического сопротивления датчиков и от их активной длины. По показаниям прибора можно определить величину относительной деформации РК-профильной ступицы.

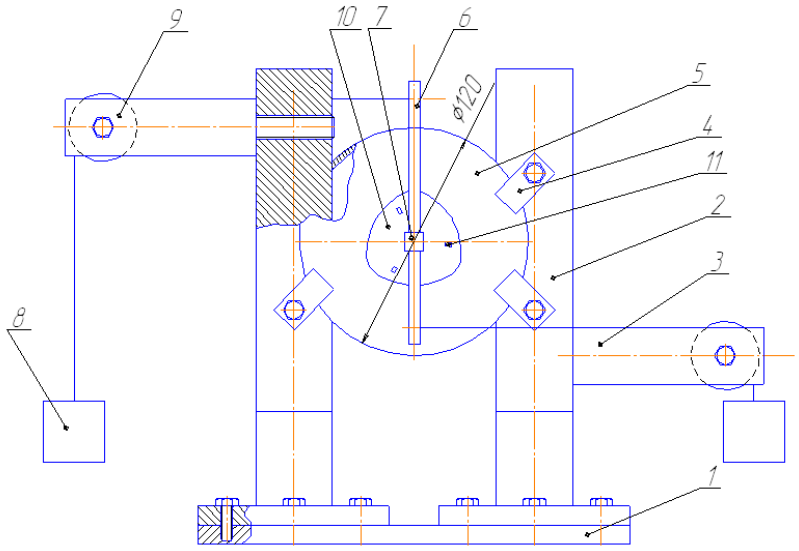


Рис. 4. Нагрузочное устройство для испытания РК-3-профильного соединения с натягом
1 – плита; 2 – стойка; 3 – штанга; 4 – Г-образные прихваты; 5 – ступица; 6 – рычаг; 7 – ось; 8 – гиревой подвес; 9 – ролик; 10 – вал; 11 – тензодатчики

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моргунов А. П. Разработка и обеспечение прочности профильных неподвижных неразъемных соединений : автореф. дис. … докт. техн. наук. – Омск, 1998 – 38 с.
2. Тимченко А. И. РК-профильные соединения и их применение в различных отраслях промышленности. // СТИН. – 1993. – №2. – С. 13–18.
3. Анурьев В. И. Справочник конструктора – машиностроителя: Т. 1. – 8-е изд., перераб. и доп. / Жестковой И. Н. – М. : Машиностроение, 2001. – 920 с. : ил.
4. Линейцев В. Ю. Контактная прочность, жесткость и точность разъемных неподвижных конических соединений в инструментальных системах : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Иркутск, 2006 – 42 с.

УДК 622.235:622.831.232

Тюпин Владимир Николаевич,
д-р техн. наук, профессор, ЗабИЖТ, ИрГУПС

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВА НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА И ОБДЕЛКИ ПРИ СООРУЖЕНИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ

V.N. Tyupin

EXPLOSION EFFECT ON THE MASSIF STRESS STATE DURING THE HANDLING OF MINING OUTPUT AND RAILWAY TUNNELING

Аннотация. *Приведен механизм действия взрыва при проходке выработок и железнодорожных тоннелей в трещиноватых напряженных горных массивах. Рассмотрены зоны действия взрыва. Зона заколов обеспечивает снижение устойчивости массива на контуре выработки. Зона взрывных остаточных напряжений (служит «сжатой пружиной») принимает участие в обрушении породы на контуре выработки и разрушении обделки тоннеля. Для снижения вредного влияния взрыва необходимо принять специальную технологию или проходить выработки и тоннели механическим способом.*

Ключевые слова: *действие взрыва, напряженно-деформированное состояние, тоннель.*

Abstract. *The mechanism of explosion action on the crumbling stressed mine massifs during the handling of mining output and railway tunneling is presented. The areas of explosion action are considered. The driving area provides the decreasing of massif stability on the working contour. The area of explosive residual stresses (serves as «compressed spring») takes part in the rock caving on the working contour and in the tunnel lining destruction. It is necessary to adopt a special technology or drive a working and tunneling mechanically to decrease a harmful effect of explosion.*

Keywords: *blast effect, intense-deformed condition, tunnel.*

Сооружение обделок железнодорожных тоннелей является весьма трудоемким и дорогостоящим процессом. В работах [1, 2] описываются принципы строительства железобетонных обделок в железнодорожных тоннелях. Расчеты обделок проводились на основании положений строительной механики с учетом горного и гидростатического давления, сейсмического действия землетрясений и особенностей возведения обделок. Воздействие на обделку тоннеля, приводящее к ее разрушению, в [1] систематизировано на три категории: транспортные нагрузки, механические и физико-химические воздействия горной геомеханики, обводненность тоннеля.

Горная геомеханика, а точнее напряженно-деформированное состояние (НДС) массива горных пород вблизи проводимой выработки, существенно влияет на устойчивость обнажений массива. НДС не нарушенного горными работами массива определяется гравитационными и тектоническими силами [3]. При проведении выработок в неоднородном горном массиве вблизи обнажений возникают зоны концентрации напряжений [4]. Помимо этого на НДС горного массива и обделки железнодорожного тоннеля влияют взрывные работы.

Для оценки влияния действия взрыва на НДС трещиноватого массива в условиях подземных горных работ ОАО «Приаргунское горно-химическое объединение» (ППГХО) были проведены несколько серий экспериментальных иссле-

дований. Исследования проводились на глубине 630…690 м от поверхности земли в горных выработках диаметром 3…4 м с использованием приборов акустической эмиссии (ЗП-5), сейсмических приборов (ПОСВ) и ультразвуковых приборов. Состояние горного массива устанавливалось до и после взрывания зарядов ВВ.

Проведенные экспериментальные исследования по деформированию трещиноватого массива взрывом позволили разработать механизм формирования зон заколов и остаточных напряжений в трещиноватом массиве при взрыве заряда ВВ параллельного открытой поверхности (рис. 1).

Под действием давления продуктов детонации (ПД) трещиноватый массив начинает смещаться во все стороны от взрываемых зарядов ВВ, что сопровождается дроблением отдельностей в зоне 3, деформациями и трением на берегах естественных трещин, а также упругими деформациями отдельностей в зонах 4 и 5. Движение части массива 2 в сторону выработанного пространства 1 сопровождается выбросом отдельностей.

После падения давления в зарядных полостях реакция упруго деформированных взрывом отдельностей и горное давление в зонах 3 и 4 приводят к смещению массива в сторону пространства 1, что сопровождается образованием заколов. Возвращению упруго деформированных отдельностей в зоне 5 в первоначальное НДС до взрыва препятствуют силы трения на берегах естественных трещин, создаваемые горным давлением. Массив за пределами зоны заколов как бы «запрессовывается», и его напряженное состояние в зоне 5 увеличивается.

Таким образом, за зоной дробления отдельностей в трещиноватом массиве находится зона заколов 4 с раскрытыми естественными трещинами и зона взрывных остаточных напряжений 5 с увеличенным напряженным состоянием отдельностей массива. Проведение следующего цикла буровзрывных работ обеспечивает превышение сил трения и разгрузку массива в зоне 5 за счет сейсмического действия взрыва, в результате чего максимум напряжений смещается вглубь массива, а напряжения в зоне максимума уменьшаются (рис. 2).

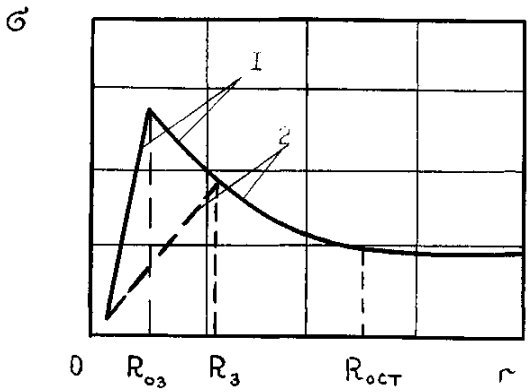


Рис. 2. Зависимость величины остаточных напряжений σ (Па) от расстояния r(м) до борта выработки: 1 – вблизи забоя выработки, 2 – на расстоянии от забоя, после разгрузки массива сейсмическим действием взрывов на проходке

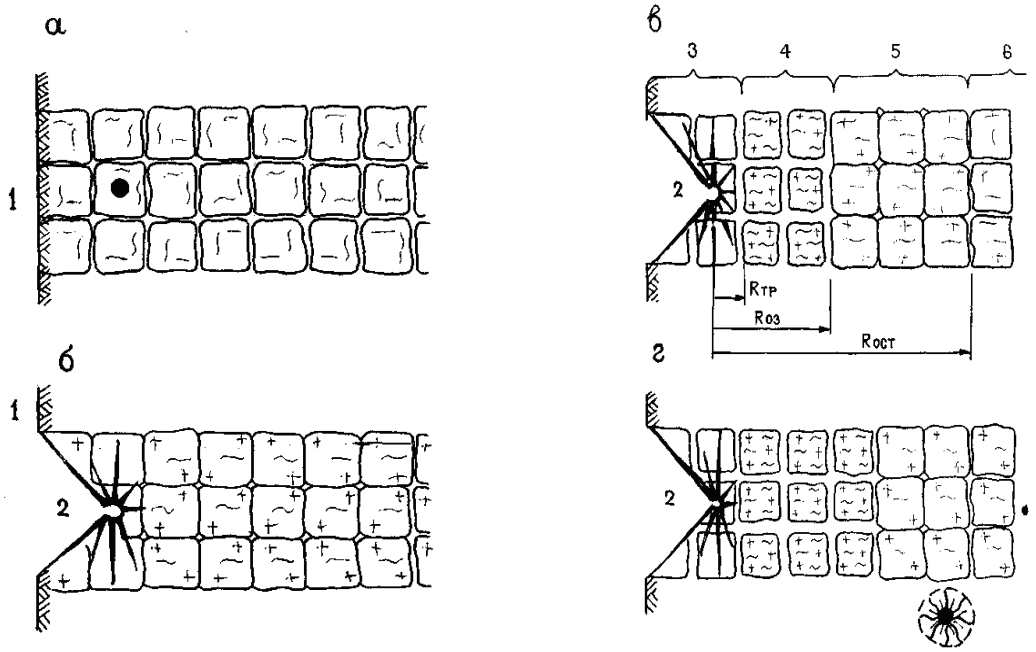


Рис. 1. Развитие процесса деформирования трещиноватого массива взрывом во времени: *а* – до взрыва, *б* – во время взрыва, *в* – после взрыва, *г* – после сейсмического воздействия очередного взрыва. 1 – выработанное пространство, 2, 3, 4, 5 – соответсвенно зоны выброса, дробления, заколов, остаточных напряжений, 6 – зона естественного состояния массива

Величина сжимающих напряжений в массиве при проведении способом БВР одиночной выработки в условиях горного давления, разработанная на основе изложенного механизма дана в формуле (1).

$$\sigma(r) = 2E_p \frac{\mu\nu}{1-\nu} \frac{\delta r}{d_e R_3} \sum_1^k \sin^2 \beta_i, \text{ при } 0 < r < R_3,$$

$$\sigma(r) = \frac{\sqrt{\pi}}{8} \frac{D\rho_в d_з c}{rK_c\Phi} \left(1 - \frac{\mu\nu}{1-\nu}\right) K_{n\perp} K_\perp(N) K_{от} + \quad (1)$$

$$+P(1-\mu), \text{ при } r \geq R_3,$$

где r – текущее расстояние от контура выработки вглубь массива; R_3 – расстояние от контура выработки до максимума в зоне остаточных напряжений на любом удалении от забоя; $R_{оз}$ – расстояние от контура выработки до максимума в зоне остаточных напряжений вблизи забоя выработки; K_c – показатель, учитывающий сейсмическое действие взрыва; $D, \rho_в, d_з$ – скорость детонации, плотность и диаметр заряда ВВ; E_p, c, ν, μ – модуль разгрузки, скорость продольной волны, коэффициент Пуассона отдельности массива, коэффициент трения между отдельностями, соответственно; $\delta, d_e, k, \beta, \Phi$ – раскрытие трещин, размер отдельности, количество систем трещин, угол наклона i-й системы трещин к обнажению, показатель трещиноватости; $K_{n\perp}, K_\perp(N), K_{от}$ – показатели, учитывающие взаимодействие зарядов ВВ и открытую поверхность; P – величина горного давления в ненарушенном массиве.

Многочисленные промышленные экспериментальные исследования, проведенные на рудниках № 1, 2, 4, 6, 8 ОАО «ППГХО», позволили установить зависимости радиуса зоны заколов (расстояние от контура выработки до дальнего закола, рис. 3). Исследования проводились по обнажению горного массива после врезки выработки в борт, перпендикулярно оси существующей выработки. Типовые параметры буровзрывных работ при проходке выработок на рудниках ОАО ППГХО: диаметр шпуров 42 мм, ВВ – аммонал 200, взрывание – электроогневое.

Промышленные экспериментальные исследования по определению зависимости радиуса зоны остаточных напряжений от среднего размера отдельности в массиве проводились методом кернов, параллельных скважин, методом разгрузки и ультразвуковым методом. Результаты приведены на рис. 4. Анализ рис. 3 и 4 показывает, что ширина (Ш) зоны остаточных напряжений (Ш=$R_{ост}$–$R_{оз}$) при размере отдельности d_e = 0,1 м, составляет 2–3 м, при d_e = 0,4 м , Ш=1–2 м, при d_e = 1,0 м, Ш = 0,5–1,0 м.

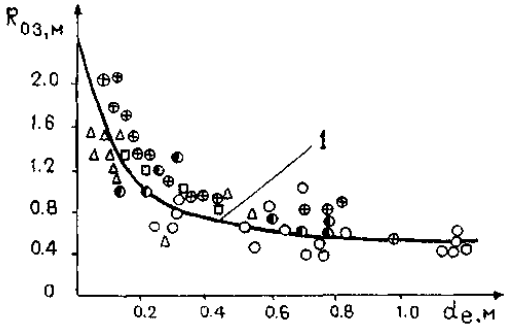


Рис. 3. Зависимость расстояния между контуром выработки и границей зоны заколов ($R_{оз}$) от размера естественных отдельностей (d_e)

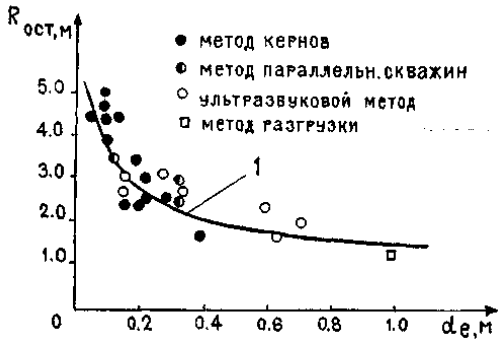


Рис. 4. Зависимость расстояния между контуром выработки и границей зоны остаточных напряжений ($R_{ост}$) от размера отдельности(d_e)

Максимальное значение величины остаточных напряжений в горном массиве очевидно находится на расстоянии $R_{оз}$. Определим, например для Северо-Муйского тоннеля, максимальную величину взрывных остаточных напряжений и величину горного давления в ненарушенном массиве. Величина $\sigma(r)$ определена по второй части формулы (1).

Средняя величина горного давления определяется в зависимости от глубины расположения тоннеля, объемной массы вышележащих пород и угла внутреннего трения массива (коэффициента трения между отдельностями массива μ) по формулам [5]. Данные приведены в табл. 1. Численные значения параметров в формуле (1): $D = 4,2 \cdot 10^3$ м/с, $\rho_в = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м^3, $d_З$ = 0,04 м, $c = 4 \cdot 10^3$ м/с, ν = 0,25, $K_{n\perp} = 2$, $K_\perp(N) = 2$, $K_{от} = 0,7$, $K_{c2} = 1,33$. Остальные параметры приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения максимальной величины остаточных напряжений и средней величины горного давления в Северо-Муйском тоннеле на глубине 500 м

d_e, м	Ф, м	μ	$P_{ср}$, 10^6, Па	$R_{оз}$, м	$\sigma(r)$, 10^6, Па
< 0,05	> 12	< 0,2	> 13,3	> 2,0	<19,6
0,05–0,15	12–10	0,2–0,3	13,3–15	2,0–1,1	19,6–30,6
0,15–0,40	10–8	0,3–0,45	15–18	1,1–0,7	30,6–48,2
0,40–1,0	8–6	0,45–0,6	18–22	0,7–0,6	48,2–69,3
> 1,0	< 6	> 0,6	> 22	<0,6	> 69,3

Примечание: d_e – средний размер отдельности, Ф – показатель трещиноватости, μ – коэффициент трения по граням отдельностей, $P_{ср}$ – величина среднего горного давления (среднеарифметическое между вертикальной и двумя горизонтальными компонентами).

Анализ табл. 1 показывает, что величина остаточных напряжений после проведения взрывных работ на дальней границе зоны заколов (в зоне максимума остаточных напряжений) в 1,5–3 раза превышает среднюю величину горного давления в глубине массива. Со временем, за счет релаксации напряжений, за счет сейсмического действия землетрясений и вибродинамического воздействия подвижного состава величина максимума остаточных напряжений уменьшается и смещается вглубь массива. При этом величина напряжений на контуре выработки или обделки железнодорожного тоннеля увеличивается и может достигать 0,3…0,5 от напряжения в максимуме, то есть 6,0…35,0 МПа.

Это приводит к нарушению обделки, так как величина прочности неповрежденного бетона составляет 40,5 МПа. Явление интенсивного нарушения обделки железнодорожного тоннеля обнаружено в Северо-Муйском тоннеле [2]. Анализ схемы трещин в тоннеле показал, что в менее трещиноватых породах интенсивность нарушения обделки более существенна, что соответствует табл. 1. Кроме того, анализ рис. 6.13 в [2] показал, что преимущественными являются горизонтальные и слабонаклонные системы трещин в обделке тоннеля. Это с точки зрения неоднородных горных массивов указывает на наличие субгоризонтальных напряжений – взрывных остаточных напряжений, участвующих в деформировании и разрушении обделки тоннелей.

Таким образом, в настоящей работе доказано появление эффекта формирования зоны взрывных остаточных напряжений в горном массиве. В последующем напряженные породы зоны остаточных напряжений деформируют породы зоны заколов и железобетонную обделку, принимая участие в ее разрушении. Уровень напряжений на контуре выработки превышает среднее горное давление в 1,2–1,5 раза и сопоставим с пределом прочности железобетонной обделки на сжатие 10…40 МПа. Это говорит о существенном влиянии пород зоны остаточных напряжений и зоны заколов на устойчивость обнажений и железобетонной обделки тоннеля.

Для снижения влияния взрывных работ при проходке тоннелей на НДС законтурного массива разработана специальная технология ведения БВР с применением контурного взрывания. Наилучшим способом проходки тоннелей и выработок можно считать механический – с помощью горнопроходческих комплексов, комбайнов, тоннелепроходческих машин, которые не создают неустойчивых зон заколов и активных зон взрывных остаточных напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быкова Н.М. Особенности работы Северо-Муйского тоннеля в условиях активной геодинамики. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – ИрГУПС, 2005, №4(8). – С.169-174.
2. Быкова Н.М., Шерман С.И. Северо-Муйский тоннель из XX в XXI век. – Новосибирск : Наука,- 2007. – 185 с.
3. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок./ Авт. А.И. Турчанинов, Г.А. Марков, В.И. Иванов, А.А. Козырев. – Л. : Наука, 1978. – 255с.
4. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механические процессы в породных массивах. – М. : Недра, 1986. – 270с.
5. Тюпин В.Н. Повышение эффективности геотехнологии с использованием энергии взрыва при деформировании трещиноватых напряженных массивов горных пород. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М. : ВНИПИПТ. – 2002. – 267 с.

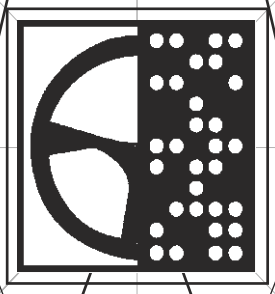
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 2.

Информатика, вычислительная техника и управление. Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 519.6:311

Краковский Юрий Мечеславович,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Информационные системы», ИрГУПС, тел. 89149269992
Михайлова Елена Александровна,
соискатель, Читинский институт БГУЭП, тел. 89244775555

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЫБРОСОВ

Y.M. Krakovsky, E.A. Mikhaylova

THE SOFTWARE FOR MULTIFACTOR FORECAST OF INDUSTRIAL POLLUTION

Аннотация. *Приводится описание созданного программного обеспечения для задачи прогнозирования, когда помимо многофакторной регрессионной модели по каждому фактору создаются прогнозные модели на основе временных рядов и экспертной информации. Исходные данные содержатся в файле MS Excel, а затем экспортируются в MatLab.*

Ключевые слова: *прогнозирование, выбросы загрязняющих веществ, программное обеспечение.*

Abstract. *Software, mathematical statement, methods of evaluation of non-linear predictive models of forecasting are given, when not only multi-factor regression models but on every factor new predictive models are made on the time series basis and expert information. A forecast is made on the basis of the last models, and its results are used in a multi-factor model. The initial data are contained in a MS Excel file, and then exported into MatLab.*

Keywords: *prediction, pollutant emissions, software.*

Введение

Развитие экономики и социальной сферы Забайкальского края в докризисный период (до 2007 года) определялось достаточно благоприятными макроэкономическими условиями, сложившимися в Российской Федерации, а также достигнутым уровнем экономического развития края, спецификой хозяйственной структуры, текущей конкурентоспособностью профильных видов экономической деятельности и регионального хозяйственного комплекса в целом.

В течение указанного периода социально-экономическое развитие края характеризовалось устойчивым ростом его важнейших параметров. Однако при этом динамика ряда индикаторов была ниже аналогичных показателей по Российской Федерации и Сибирскому федеральному округу.

В 2007 году объем произведенного валового регионального продукта в сопоставимых ценах составил 148,7 % по отношению к уровню 2000 года, что на 6,3 процентного пункта меньше среднего показателя по Сибирскому федеральному округу и на 14,4 процентного пункта ниже соответствующего среднероссийского значения.

Особенности промышленного потенциала Забайкальского края

Темпы роста промышленного производства в крае в течение указанного периода, составив немногим более 122 %, значительно уступали соответствующим темпам по Российской Федерации (148 %) и Сибирскому федеральному округу (142 %). При этом преобладающая в этом секторе экономики добывающая промышленность имела прирост выпуска продукции за весь наблюдаемый период на уровне около 23 % при 39 % по Российской Федерации и 63 % по Сибирскому федеральному округу. Достаточно быстро в этот период развивалась обрабатывающая промышленность, темпы роста которой в крае составили почти 182 %, что на 22 процентных пункта превышает ее среднероссийскую динамику и на 38 процентных пунктов выше темпов ее роста по Сибирскому федеральному округу.

Необходимость преодоления существующего отставания края в экономическом развитии от других регионов связана прежде всего с реализацией крупномасштабных инвестиционных проектов в профилирующих отраслях экономики региона, в инфраструктурном секторе и социальной сфере.

Реализация инвестиционных проектов и развитие инфраструктуры тесно связаны с решением экологических проблем, включая проведение исследований и мониторинга технического состояния атмосферного воздуха.

Территория Забайкальского края характеризуется малой способностью к самоочищению атмосферы. Эту особенность определяют несколько причин:

- преимущественно безветренная погода в зимний период (Сибирский антициклон);
- преобладание горно-котловинного рельефа на значительной части территории: в безветренную погоду это способствует застаиванию воздуха в нижней части котловин;
- интенсивное переохлаждение почвы, способствующее охлаждению приземных слоев атмосферы;
- малое количество снега, влияющее на слабое рассеивание примесей в атмосфере.

Все это способствует формированию малоустойчивых природных систем, что создаёт предрасположенность к загрязнению атмосферного воздуха, поверхностных вод и почв.

Как отмечается в работе [1], управление природоохранными мероприятиями требует прогнозной информации о выбросах загрязняющих веществ, необходимой для принятия управленческих решений при разработке и реализации инвестиционных проектов. От качества прогнозных оценок, их эффективного использования в процессе управления мероприятиями по охране атмосферы в регионе зависит эффективность развития экономики края.

Целью работы является создание и апробация программного обеспечения многофакторного прогнозирования промышленных выбросов загрязняющих веществ.

Общие сведения

При создании программного обеспечения важным фактором является доступность, поэтому работа с программным продуктом происходит в среде Windows. Программная среда для разработки программного обеспечения была выбрана с учетом множества требований и специфики работы. Оценив достоинства и недостатки существующих программных продуктов, было решено использовать в качестве оболочки пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MatLab фирмы MathWorks. Продукт данной фирмы наиболее подходит к решению универсальных задач в различных сферах практической деятельности, а также имеет широкий спектр функций для математических вычислений, адаптированных специально для решения поисковых задач. Это сочетается с мощными средствами графической визуализации и даже анимационной графики.

Важными достоинствами системы являются ее открытость и расширяемость. Большинство команд и функций системы реализованы в виде текстовых m-файлов (с расширением .m) и файлов на языке С, причем все файлы доступны для модификации. Пользователю дана возможность создавать не только отдельные файлы, но и библиотеки файлов для реализации специфических задач.

Исходные данные содержатся в файле MS Excel, а затем экспортируются в MatLab. Пользователь предлагаемого программного продукта получает возможность редактировать данные, формировать выборку, производить статистический анализ выбранных данных.

Многофакторное прогнозирование

В связи с вышесказанным в работе предлагается многофакторное прогнозирование, основанное на том, что для оценки суммарного объема выбросов загрязняющих веществ, отходящих от различных источников народного хозяйства, предлагается многофакторная регрессионная модель.

По каждому фактору создаются прогнозные модели на основе временных рядов с применением двух типов информации – статистической и экспертной. Это позволяет обеспечить два подхода к прогнозированию: а) на основе только статистической информации (однородная информация, когда используется только «предыстория» рассматриваемого показателя); б) на основе статистической и экспертной информации (разнородная информация, когда помимо предыстории используется информация, полученная от квалифицированных в рассматриваемой области специалистов-экспертов).

По последним моделям делаются прогнозы, результаты которых используются в многофакторной модели. Прогнозные модели для временных рядов могут быть линейными и нелинейными.

Программное обеспечение задачи

Главное окно программы состоит из пунктов «Ввод данных», «Многофакторные регрессионные модели», «Прогнозирование», «Помощь», «Выход» (рис. 1).

Пункт меню «Ввод данных» содержит «Ввод данных по показателю» и «Ввод данных по факторам». Пользователь имеет возможность вводить статистические данные как из книги MS Excel, так и вручную с клавиатуры.

Рис. 1. Главное окно программы

После ввода данных необходимо выбрать тип многофакторной регрессионной модели (рис. 2).

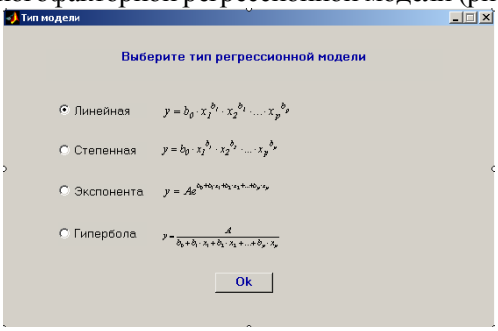


Рис. 2. Окно «Тип регрессионной модели»

После выбора типа регрессионной модели производится оценка ее параметров. Дополнительно вычисляются стандартизированные коэффициенты регрессии β, стандартные ошибки β, стандартные ошибки параметров, фактические значения t-критерия и p-значения. Также производится расчет F-критерия Фишера и стандартной ошибки. Статистически незначимые факторы исключаются из модели.

В результате на экран выводится модель со статистически значимыми коэффициентами, регрессионная статистика и итоги проверки адекватности модели. На рис. 3 приведен пример для линейной регрессионной модели.

Пункт меню «Прогнозирование» (рис. 1) содержит «Прогнозирование факторов» и «Прогнозирование по многофакторной модели». При выборе пункта «Прогнозирование факторов» на экран выводится окно, в котором пользователю необходимо выбрать показатель, ввести период упреждения прогноза, определить тип информации (однородная или неоднородная), а также выбрать тип модели для прогнозирования (рис. 4).

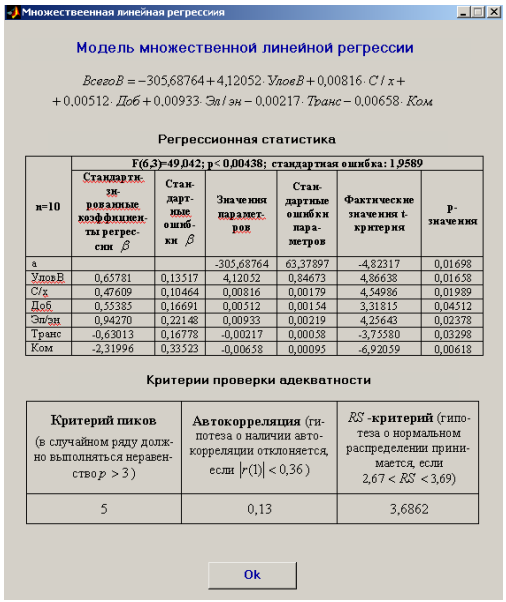


Рис. 3. Окно «Множественная линейная регрессия»

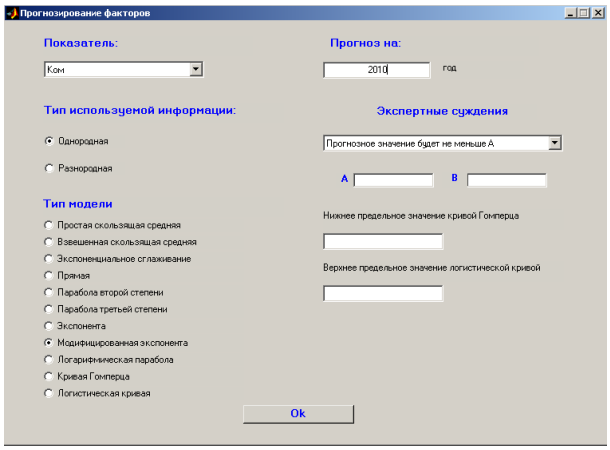


Рис. 4. Окно «Прогнозирование факторов» при использовании однородной информации

Для оценки параметров прямой, параболы второй и третьей степени, экспоненты и логарифмической параболы при однородной информации реализуется МНК, для модифицированной экспоненты и кривой Гомперца используется метод Левенберга – Марквардта [2], для логистической функции – метод Родса [3].

Результатом работы данного модуля программы является окно «Результаты прогнозирования по однородной информации». На рис. 5 приведен пример для фактора *Ком* – предоставление коммунальных, социальных и персональных услуг, тыс. т.

При нажатии на кнопку «Совет» пользователь может получить комментарии и совет по использованию тренда.

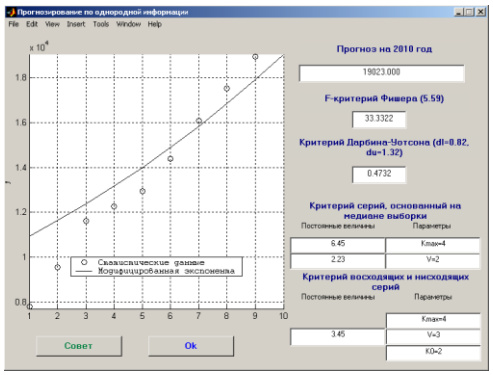


Рис. 5. Окно «Прогнозирование по однородной информации»

При выборе разнородной информации окно «Прогнозирование факторов» имеет вид, изображенный на рис. 6. В данном случае необходимо из раскрывающего списка выбрать тип экспертного суждения и ввести параметры *A* и *B*. В качестве основного алгоритма оценки параметров нелинейных моделей по методу наименьших модулей используется метод Ньютона – Гаусса [4].

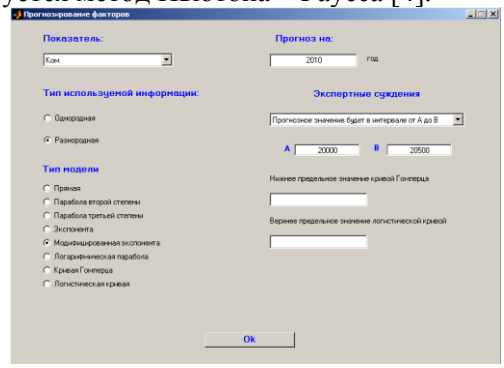


Рис. 6. Окно «Прогнозирование факторов» при использовании разнородной информации

В результате выводится окно (рис. 7), в котором представлен график аппроксимирующей кривой и результаты проверки адекватности полученной модели. Дополнительно пользователь может получить совет по использованию данной модели для прогнозирования фактора.

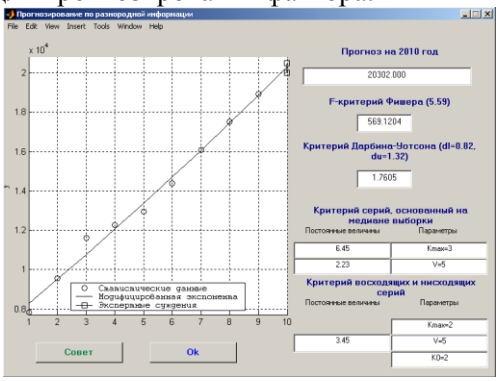


Рис. 7. Окно «Прогнозирование по разнородной информации»

Выполнив прогнозирование факторов, пользователь может перейти к пункту меню «Прогнозирование по многофакторной модели». В результате на экран выводится окно программы «Прогнозирование по многофакторной модели» (рис. 8). Пользователю необходимо выбрать тип многофакторной модели для прогнозирования, тип используемой информации, а также для каждого фактора прогнозную модель (списки формируются из набора адекватных моделей и с учетом типа информации – однородной или разнородной). При нажатии на кнопку «Рассчитать прогноз» на экран выводится значение и ошибка прогноза (период упреждения зависит от того, на какой год производился прогноз по факторам).

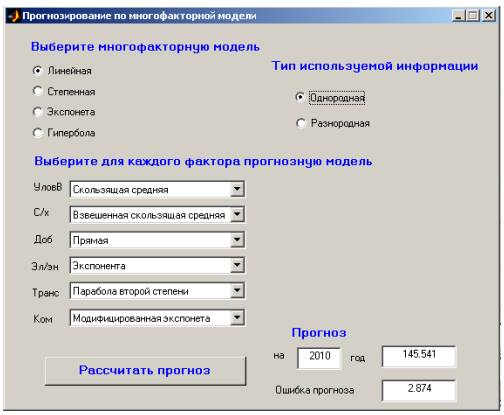


Рис. 8. Окно «Прогнозирование по многофакторной модели»

Выводы

Созданное программное обеспечение «Многофакторное прогнозирование выбросов загрязняющих веществ» позволяет создавать многофакторные регрессионные модели и рассчитывать прогнозные значения, когда дополнительно по каждому фактору создаются прогнозные модели на основе временных рядов и экспертной информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Краковский Ю. М., Михайлова Е. А. Многофакторное прогнозирование выбросов загрязняющих веществ на примере Забайкальского края // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 2.
2. Демиденко Е. З. Линейная и нелинейная регрессии. – М. : Финансы и статистика, 1981.
3. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. – М. : Статистика, 1975.
4. Колемаев В. А. Эконометрика. – М. : Инфра-М, 2006.

УДК 656.065+519.876

Лемперт Анна Ананьевна,
канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник,
Институт динамики систем и теории управления СО РАН, тел.: 45-30-30, e-mail: lempert@icc.ru
Плетнева Анна Эдуардовна,
соискатель, Иркутский государственный технический университет,
e-mail: kattastrroffa@mail.ru
Фу Фыок Гуй,
аспирант, Иркутский государственный технический университет,
e-mail: phuphuochuy@yahoo.com
Казаков Александр Леонидович,
д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник,
Институт динамики систем и теории управления СО РАН,
тел.: 45-30-33, e-mail: kazakov@icc.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ВСЖД

A.A. Lempert, A.E. Pletneva, Phu Phuoc Huy, A.L. Kazakov

MODELING AND FORECASTING OF FUEL CONSUMPTION FOR SPECIAL ROLLING STOCK ON THE EAST-SIBERIAN RAILWAY

Аннотация. *В работе рассматривается построение и применение математической модели, которая описывает работу специальных самоходных подвижных составов на Восточно-Сибирской железной дороге с точки зрения снабжения горюче-смазочными материалами. На основе созданной модели разработана методика прогнозирования расходов топлива, которая реализована в виде программной системы.*

Ключевые слова: *железнодорожный транспорт, стохастическая математическая модель, управление запасами, прогнозирование, тренд, программная система.*

Abstract. *A problem of creation and application of a mathematical model that describes the work of the special self-propelled rolling stock on the East-Siberian railway in terms of supply of fuels and lubricants is considered. The forecasting technique based on the designed mathematical model is developed. The software is created.*

Keywords: *railway transport, stochastic mathematical model, inventory control, forecasting, trend, software system.*

Введение

Одним из факторов, влияющих на повышение производственно-экономической эффективности работы предприятий транспорта, является система управления материальными запасами, которая должна предоставлять возможность определять величину запаса того или иного ресурса, сроки заказов и их размеры.

На данный момент на ВСЖД для специальных самоходных подвижных составов научно обоснованная система управления запасами отсутствует.

Задачи управления запасами являются в математическом смысле одними из самых сложных, которые существуют в области управления. При этом в условиях рыночной экономики, особенно на уровне микрологистических систем [1], применение детерминированных моделей зачастую оказывается неэффективным, т. к. на систему оказывают существенное влияние случайные факторы, например погодные условия, чрезвычайные ситуации, человеческий фактор и др. В этом случае адекватно описать процесс можно с использованием стохастических (вероятностных) моделей [2–4].

В работе строится стохастическая математическая модель функционирования парка специального самоходного подвижного состава на ВСЖД и на ее основе, в частности, производится прогнозирование расходования топлива.

Прогнозирование – это важный этап принятия решения в ходе управления запасами, поскольку качество прогноза непосредственно отражается на качестве принимаемых управленческих решений. Поэтому для эффективного управления

запасами важно правильно выбрать методику прогнозирования.

1. Описание предметной области

Специальный самоходный подвижной состав (ССПС) – железнодорожный подвижной состав (дрезины, автомотрисы, самоходные машины, автономные снегоуборочные поезда, самоходные путеукладчики, самоходные щебнеочистительные машины) для обслуживания устройств и оборудования железных дорог: пути, контактной сети и устройств энергоснабжения, устройств связи централизации и блокировки [5]. ССПС с пассажирскими кабинами также используются и для перевозки людей к местам проведения работ.

На Восточно-Сибирской железной дороге (ВСЖД) Иркутским информационно-вычислительным центром (ИрИВЦ) была разработана автоматизированная система контроля процесса эксплуатации специального самоходного подвижного состава и допуска бригад к работе (АСУ ССПС), в которой реализована подсистема «Учет топлива». Подсистема по учету топлива позволяет:

- вести автоматический учет расхода топлива;
- проводить анализ рационального расхода топлива на маршруте (расчет фактического расхода в сравнении с нормативными величинами);
- осуществлять контроль нерационального расхода топлива с информированием в статистических формах о перерасходе;
- производить выдачу статистических отчетных форм, позволяющих контролировать расход топлива по различным позициям (за период, по предприятию, службе, машине, машинисту и т. д.)

В объеме маршрутного листа учтены все позиции поступления и расходования топлива на машине (заправка, дозаправка на маршруте, передача на другую машину, получение с другой машины, расход на прочие нужды). Детальный учет позволяет полноценно отражать расход топлива, как в объеме единичного маршрута, так и в целом по предприятию.

2. Математическая модель

Построим математическую модель, описывающую работу ССПС на ВСЖД с точки зрения снабжения горюче-смазочными материалами (ГСМ).

Математическая модель описывает основные эксплуатационные характеристики функционирования парка ССПС и состоит из трех случайных векторов

$$\overline{P} = (p_1, ..., p_{12}),$$

$$\overline{X} = (x_1, ..., x_{12}),$$

$$\overline{Y} = (y_1, ..., y_{12}),$$

где $\overline{P}$ – вектор расхода топлива за год по месяцам, $\overline{X}$ – вектор дальности маршрутов за год по месяцам, $\overline{Y}$ – вектор количества маршрутов за год по месяцам.

Компоненты векторов являются случайными величинами, законы распределения которых заранее неизвестны. Для того чтобы их определить, используем известные статистические данные: $\overline{R_j}, \overline{D_j}, \overline{K_j}$, $j = 2006, ..., 2010$. Здесь

$\overline{R_j}$ – фактический расход топлива по месяцам в *j*-м году,

$\overline{D_j}$ – фактическая дальность маршрутов по месяцам в *j*-м году,

$\overline{K_j}$ – фактическое количество маршрутов по месяцам *j*-м году.

3. Исходные данные

Вся информация, заносящаяся в АСУ ССПС, хранится в базе данных, реализованной в среде СУБД Oracle.

При помощи запросов, написанных на структурированном языке запросов SQL, из БД извлечена статистическая информация, необходимая для идентификации математической модели. Информация отобрана с учетом человеческого фактора, т. к. при заполнении маршрутных листов возможен ввод некорректных данных. Учитывая это, при отборе статистических данных были исключены маршрутные листы:

– с незаполненными полями о топливе;

– с фактическим расходом топлива, превышающим норму расхода более чем в 1,5 раза;

– если ССПС использовался для перевозки топлива на другую машину;

– если дальность маршрута превышает 624 километра, т. к. длительность маршрута не может превышать 12 часов, а средняя скорость движения ССПС – 52 км/ч.

В результате получены статистические данные по расходу топлива и дальности для каждого маршрута, а также по количеству маршрутов в месяц за период 2006–2010 гг.

4. Установление закона распределения расхода топлива и дальности маршрутов

На рис. 1 представлена гистограмма распределения расхода топлива на поездку за январь 2010 г. и графики функций разных теоретических распределений.

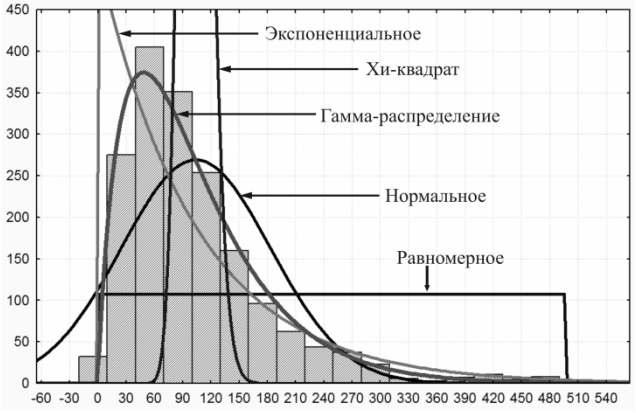


Рис. 1. Гистограмма распределения расхода топлива и графики функций разных распределений

Особенности технологического процесса и вид гистограммы позволяют высказать предположение о том, что выборки расхода топлива подчиняется гамма-распределению. Плотность гамма-распределения имеет вид

$$f_x(x,k,\lambda)=\begin{cases} x^{k-1}\dfrac{e^{-\frac{x}{\lambda}}}{\lambda^k\Gamma(k)}, x\ge 0 \\ 0, x<0 \end{cases},$$

где k – параметр формы, λ – параметр масштаба, $\Gamma(k)$ – гамма-функция Эйлера, которая определяется формулой

$$\Gamma(k)=\int_0^{+\infty} x^{k-1}e^{-x}dx.$$

Такой выбор представляется логичным еще и потому, что гамма-распределение наиболее адекватно для описания спроса в экономико-математических моделях управления запасами (логистики) [6]. Параметры k и λ вычисляются по методу моментов [7].

Таким образом, сформирована статистическая гипотеза H_0: анализируемая выборка «расход топлива» подчиняется гамма-распределению с параметрами формы (k) и масштаба (λ).

Проверим гипотезу H_0 при уровне значимости $\alpha=5\,\%$ посредством критерия согласия Колмогорова – Смирнова [8]. Известно [9], что именно этот критерий предпочтительнее использовать при выборках большого объема ($n>100$).

Гипотеза H_0 не отвергается, если эмпирическое значение критерия $К_{эмп}$ меньше критического $К_{крит}$.

$К_{крит}=\dfrac{1,63}{\sqrt{N}}$, где N – количество элементов в выборке.

$К_{эмп}$ рассчитаны с помощью модуля Distribution Fitting в среде пакета STATISTICA с помощью модуля Distribution Fitting, который предназначен для сравнения имеющегося распределения с теоретическим.

По результатам расчетов в 95 % случаев нет оснований отвергнуть гипотезу H_0.

Аналогичным образом формируется и проверяется гипотеза H_1: дальность маршрутов подчиняется гамма-распределению. В 100 % случаев нет оснований отвергнуть гипотезу H_1.

5. Прогнозирование на основе средних показателей

Прогноз на основе средних показателей базируется на данных предыдущих месяцев.

Скорость изменения уровней динамического ряда за определенный отрезок времени $[t_0,t_n]$ характеризуется средним абсолютным приростом. Вначале будем строить прогноз в виде [8]

$$y_p=y_b+\overline{\Delta}\cdot L,$$

где y_p – прогнозируемый уровень; y_b – уровень, принятый за базу экстраполяции; $\overline{\Delta}=\dfrac{y_n-y_0}{n}$ – средний абсолютный прирост уровня в единицу времени, где y_0 – расход топлива в начале рассматриваемого периода, y_n – расход топлива в конце рассматриваемого периода; L – период упреждения (в месяцах).

Поскольку анализ временных рядов показывает, что помимо данных за ближайшие месяцы необходимо учитывать фактор сезонности, базисные значения рассчитываются по формуле

$$y_b=a\cdot\overline{z}+(1-a)\cdot\overline{w},$$

где a – доверительный коэффициент (в данной работе $a=0,46$); $\overline{z}$ – среднее значение за тот же месяц предыдущих годов; $\overline{w}$ – среднее значение за предыдущие 2 месяца.

По данным формулам рассчитаны прогнозируемые значения расхода топлива на 2007–2011 гг.

Сравнение прогнозируемых значений расхода топлива на 2007 и 2008 гг. с реальными показало, что в 10 месяцах из 12 реальные значения попали в доверительный интервал прогнозируемых значений и в 2007 и в 2008 гг., а в 2009 менее 50 % спрогнозированных значений попали в доверительный интервал.

На рис. 2 представлены графики фактических значений расхода топлива по месяцам.

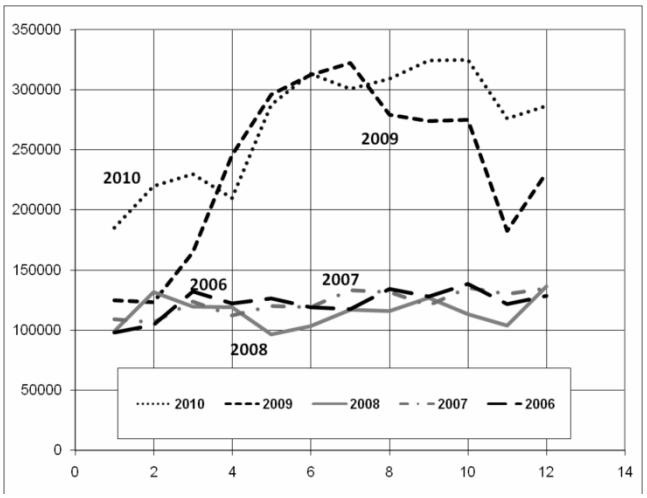


Рис. 2. Расход топлива по месяцам 2006-2010 гг.

По графикам видно, что расход топлива в 2009–2010 гг. резко отличается от расхода топлива в 2006–2008 гг. Это объясняет причину несоответствия прогноза на основе средних показателей фактическим данным на 2009 и 2010 гг. Сделаем прогноз на 2009 и 2010 гг. на основе экстраполяции тренда.

6. Прогнозирование на основе экстраполяции тренда

Для прогнозирования расхода топлива были использованы различные тренды, однако исходя из имеющихся статистических данных, а также анализа ситуации в экономике страны и региона, было высказано предположение о том, что для построения прогноза следует использовать квадратичный тренд.

Построенное на основе данных о расходе топлива за 2009 и 2010 гг. уравнение тренда имеет вид

$$y = 0,0835x^2 - 3,5801x + 135,28$$

На рис. 3 пунктирной линией представлен полиномиальный тренд второй степени для 2009–2010 гг. с прогнозом на 2011 г. Для данного тренда характерно убывание в 2009 и начале 2010 года и ускоряющийся рост со второй половины 2010 года.

На основе уравнения тренда строится точечный прогноз, однако тренд характеризует лишь тенденцию, а значения временного ряда содержат случайную компоненту. Поскольку данная случайная компонента есть непрерывная случайная величина, которая, как известно, принимает любое заданное значение с нулевой вероятностью, то для целей исследования необходимо построить интервальный прогноз.

Рис. 3. Параболический тренд для 2009–2010 гг. с прогнозом на 2011 г.

В основе расчета доверительного интервала прогноза лежит показатель колеблемости уровней динамического ряда относительно тренда (S_y), которая определяется формулой [10]

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - m - 1}},$$

где y – фактические значения расхода топлива; $\hat{y}$ – рассчитанные значения расхода топлива на основе уравнения линии тренда; n – длина интервала исходных данных; m – число параметров в уравнении тренда (без свободного члена).

Рассчитаем S_y при $n = 24$ (2 года), $m = 2$ (для параболического тренда), получим $S_y = 4.48$. Тогда доверительный интервал для тренда составит

$$\hat{y} \pm t_\alpha S_y,$$

где t_α – табличное значение критерия Стьюдента.

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n - m - 1 = 21$, имеем $t_\alpha = 2,08$. Таким образом, доверительный интервал для тренда равен: $\hat{y} \pm 4,48 \cdot 2,08$ или $(\hat{y} - 9,31, \hat{y} + 9,31)$.

Границы прогнозируемого интервала представлены на рис. 3 серыми линиями.

Сравнение спрогнозированных значений расхода топлива с реальными показало, что прогноз на 2009 г. совпал с реальными значениями на 100 %, а в 2010 г. в доверительный интервал не попало минимальное значение расхода топлива на 2010 г. – апрель. На основе полученных данных можно сделать вывод, что прогноз на основе экстраполяции тренда за предыдущие 2 года дает эффективность 96 %, следовательно, является лучшим и на основе его можно сделать прогноз на 2011 г.

Для того, чтобы оптимизировать процесс закупки и хранения топлива, необходимо спрогно-

зировать значения расхода топлива в зависимости от количества поездок:

$$p_i = (\hat{y} \pm 9{,}31)k_i.$$

На рис. 4 представлен прогноз расхода топлива на 2011 год.

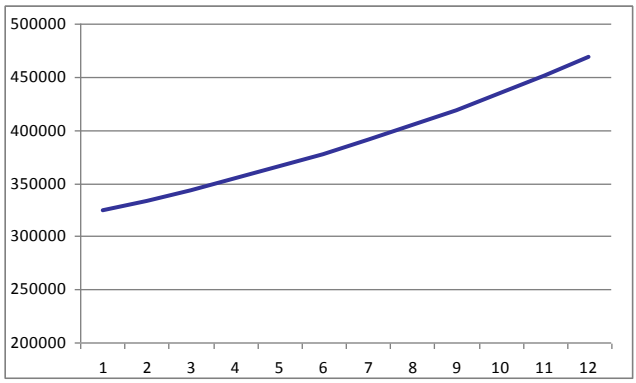


Рис. 4. График спрогнозированных значений расхода топлива в месяц за 2011 г. в зависимости от количества маршрутов

На основе прогноза можно сделать вывод, что на каждый месяц потребуется закупить в интервале $pi \pm \gamma$ топлива, где γ – доверительный интервал.

Во время выполнения работы стали известны фактические значения расхода топлива за январь и февраль за 2011 год, что позволило проверить достоверность прогноза. На рис. 3 видно, что реальные значения (ломаная линия, 2011 г.) находятся рядом с линией тренда, что подтверждает качество прогноза.

7. Программная реализация

С использованием языка программирования Delphi создана программная система «Управление запасами ГСМ», которая содержит в себе базу данных, реализованную в среде СУБД Interbase.

Целью создания ПС «Управление запасами ГСМ» является реализация:

- оптимизации хранения информации о расходе ГСМ, дальности маршрутов, количестве маршрутов за каждый месяц;
- графического представления информации для анализа;
- прогнозирования расхода топлива на основе средних показателей за предыдущие месяцы;
- прогнозирования расхода топлива на основе данных за предыдущие месяцы методом экстраполяции тренда.

Программная система разработана по модульному принципу и представляет собой набор функционально законченных модулей.

В состав ПС входят следующие модули:

- *Data:* модуль просмотра информации о расходе топлива, дальности маршрутов и количестве маршрутов в виде таблиц и гистограмм;
- *All data:* модуль заполнения и просмотра информации, хранящейся в базе данных; просмотра информации о расходе топлива, дальности маршрутов и количестве маршрутов в виде гистограмм и графиков;
- *Import data:* модуль ввода информации о расходе топлива, дальности и количестве маршрутов за один или несколько маршрутов, а также импорт информации из .txt или .xls файла;
- *Compare:* модуль сравнения информации о расходе топлива, дальности маршрутов и количестве маршрутов по годам;
- *Forecast:* модуль прогноза на основе средних показателей;
- *Trend:* модуль прогноза на основе экстраполяции тренда.

Система выполняет следующие функции:

- учет расхода топлива, дальности маршрутов и количества маршрутов;
- добавление, изменение и удаление информации о расходе топлива, дальности маршрутов и количестве маршрутов;
- отображение информации в таблицах;
- построение графической модели расхода топлива, дальности маршрутов и количества маршрутов;
- построение прогноза расхода топлива на основе средних показателей;
- построение прогноза расхода топлива на основе экстраполяции тренда с учетом выбора линии тренда: линейный, параболический, экспоненциальный, гиперболический, показательный, логарифмический тренды.

На рис. 5 представлен пример работы программной системы.

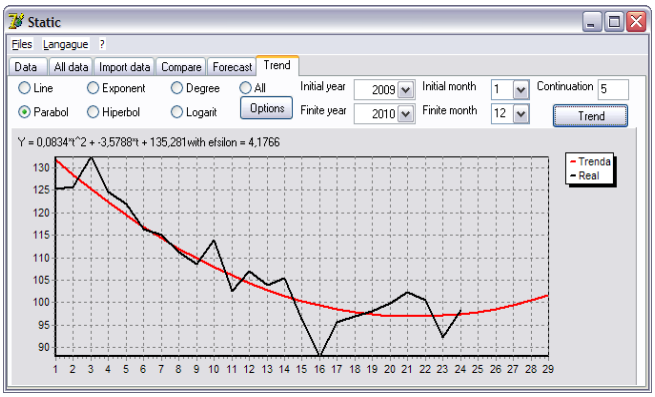


Рис. 5. Пример работы модуля Trend

8. Заключение

В ходе выполнения работы построена и исследована математическая модель управления запасами горюче-смазочных материалов для специальных самоходных подвижных составов на ВСЖД.

При разработке математической модели было установлено, что функционирование парка ССПС на ВСЖД может быть адекватно описано с использованием стохастической (вероятностной) модели. При структурной идентификации модели было установлено, что выборки расхода топлива и дальности маршрутов подчиняются гамма-распределениям.

С использованием предлагаемой математической модели были разработана методика прогнозирования расходов топлива, дальности и количества маршрутов для различных периодов, на основе которой создана программная система «Управление запасами ГСМ». С ее помощью построены точечные и интервальные прогнозы расхода ГСМ, которые показали хорошее соответствие имеющимся реальным данным.

Таким образом, результаты исследования позволяют повысить эффективность управления запасами горюче-смазочных материалов для ССПС на ВСЖД, сократить издержки на хранение запасов и снизить риск возникновения дефицита топлива.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 11-07-00245.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукинский В. С. Модели и методы теории логистики. СПб. : Питер, 2008. – 448 с.
2. Казаков А. Л., Маслов А. М. Моделирование входящего транспортного потока на грузовую станцию с учетом его суточной неравномерности // Транспорт Урала. – 2008. – № 2. – С. 65–72.
3. Казаков А. Л., Маслов А. М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 3 (23). – С. 27–32.
4. Казаков А. Л., Маслов А. М. Применение имитационного моделирования для синтетического планирования грузовых терминалов железнодорожного транспорта // Вестн. ИрГТУ. – 2010. – № 6 (46). – С. 146–153.
5. Филиппов М. М., Уздин М. М., Ефременко Ю. И. Железные дороги. Общий курс : Учеб. для вузов. – М. : Транспорт, 1991. – 257 с.
6. Орлов А. И. Математика случая. Вероятность и статистика – основные факты : учеб. пособие. М. : МЗ-Пресс, 2004. – 110 с.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. – М. : Высшая школа, 1972. – 368 с.
8. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М. : Наука, 1983. – 416 с.
9. Лемешко Б. Ю., Постовалов С. Н. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – Новосибирск : НГТУ, 1998. – 126 с.
10. Громова Н. М., Громова Н. И. Основы экономического прогнозирования. – М. : Академия Естествознания, 2006. – 444 с.

УДК 66.096

Скачков Илья Владимирович,
аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии, e-mail: Iliya_8_7@mail.ru
Бальчугов Алексей Валерьевич,
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии, e-mail: balchug@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСОРБЦИИ НА НАСАДКЕ

I.V. Skachkov, A.V. Balchugov

THE DESORPTION IN THE PACKING LAYER MATHEMATICAL MODELING

Аннотация. *Математически смоделирован процесс десорбции газа из жидкости в слое насадки. Исследована зависимость концентрации газа в жидкости от высоты слоя и вида используемой насадки в массообменном аппарате. Описан способ создания слоя регулярной насадки, позволяющий существенно экономить материалы на ее изготовление.*

Ключевые слова: *десорбция, массоперенос, регулярная насадка.*

Abstract. *The process of the gas desorption from the liquid in the packing layer is mathematically modeled. The dependence of the gas concentration in the liquid from the layer height and type of packing used in the mass exchange apparatus is researched. The method of a regular packing layer creation, that allows essentially economy of materials for the layer manufacture is described.*

Keywords: *desorbtion, mass transfer, regular packing.*

В настоящее время известны различные типы насадок для проведения массообменных процессов в системах «газ – жидкость»: кольца Рашига, седла Берля, хордовые насадки, листовые, сеточные и т. д. Общим недостатком большинства типов насадок являются довольно большие затраты достаточно дорогих материалов (металла, керамики и т. д.) на их изготовление. Так, на изготовление 1 м^3 колец Рашига (50×50×1) затрачивается 430 кг стали. Предлагается новый тип насадки, состоящей из каркаса и лент (рис. 1), требующей значительно меньших затрат материала.

Сущность способа изготовления регулярной насадки заключается в том, что для сборки слоя насадки предлагается установить каркас, элементы которого могут быть выполнены как из металлических стержней, уголков полых трубок или проволоки, так и из плетеных канатов или других неметаллических материалов, устойчивых к среде, в которой будет применена предлагаемая насадка. Затем на каркас закрепляются элементы насадки в виде плоских лент.

Таким образом, при реализации данного способа изготовления регулярной насадки несущая способность переносится с элементов насадки, непосредственно участвующих в процессе массообмена и создающих удельную площадь насадки на каркас, что разрешает делать эти элементы из тонких металлических лент или пластика, или химически и механически стойкой ткани.

В частности, новая насадка может быть применена для проведения десорбции сероводорода из воды – процесса, применяемого на химических производствах для очистки технологической воды. В настоящее время процесс осуществляется в колонных аппаратах, заполненных кольцами Рашига. Сверху в аппарат подается загрязненная вода, а выделившийся газ отводится через штуцер в верхней части аппарата. Таким образом, фазы (газ и жидкость) движутся в противотоке.

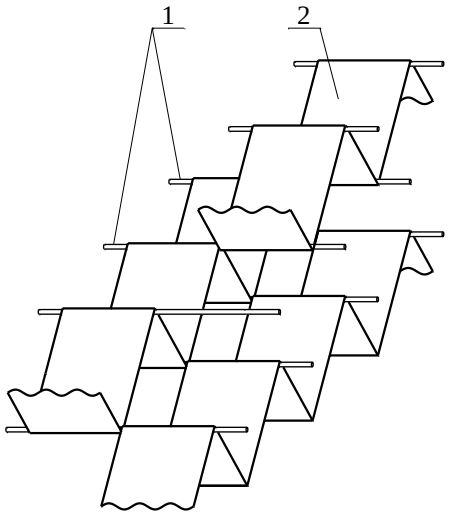


Рис. 1. Ленточная насадка:
1 – прутья каркаса, 2 –ленты

Представляет интерес оценке эффективности массопереноса при десорбции сероводорода из воды на предложенной насадке. Как и в случае применения колец Рашига, в аппарате сверху стекает раствор сероводорода в воде на слой насадки. Принимаем, что по высоте слоя насадки коэффициент массоотдачи в жидкой фазе остается постоянным. Массопередача между жидкой и газовой фазами лимитируется массоотдачей в жидкости. В этом случае массообмен между газовой и жидкой фазами в аппарате описывается уравнением

$$w_{ж}\upsilon_{ж}\frac{dC}{dz}-\beta_{ж}a\Delta=0, \qquad (1)$$

где $w_{ж}$ – истинная средняя скорость жидкости в аппарате, м/ч; $\upsilon_{ж}$ – содержание жидкости в слое насадки, м^3/м^3; C – концентрация сероводорода в жидкости, кмоль/м^3; z – высота слоя насадки, м; $\beta_{ж}$ – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/ч; a – удельная поверхность контакта фаз в слое насадки, *м^2/м^3*; Δ – движущая сила массоотдачи в жидкости, кмоль/м^3.

Движущая сила массоотдачи в жидкой фазе при десорбции описывается уравнением

$$\Delta=C-C^{*}, \qquad (2)$$

где C^{*} – равновесная концентрация сероводорода в жидкости, кмоль/м^3.

После подстановки уравнения (2) в уравнение (1) получаем:

$$k\frac{dC}{dz}-mC+n=0, \qquad (3)$$

где $k=w_{ж}\cdot\upsilon_{ж}$, $m=\beta_{ж}a$, $n=\beta_{ж}aC^{*}$.

Решив уравнение (3), получим зависимость для определения высоты слоя насадки. Уравнение (3) является уравнением с разделяющимися переменными: $k\frac{dC}{mC-n}=dz$. Интегрируем и получаем

$$z=\frac{k}{m}\ln\left(\frac{mC^{B}-n}{mC^{H}-n}\right)=\frac{w_{ж}\upsilon_{ж}}{\beta_{ж}a}\ln\frac{C^{B}-C^{*}}{C^{H}-C^{*}}, \qquad (4)$$

где C^{B} и C^{H} – концентрация сероводорода в жидкости соответственно в верхней и нижней части аппарата, кмоль/м^3.

По уравнению (4), задавшись концентрацией сероводорода в жидкости вверху и внизу аппарата, можно определить требуемую высоту слоя насадки z, м.

Преобразовав уравнение (4), получаем зависимость для определения концентрации сероводорода в любом сечении аппарата:

$$C=\frac{n}{m}+\frac{mC^{B}-n}{m\cdot\exp\left(\frac{z\cdot m}{k}\right)}=C^{*}+\frac{C^{B}-C^{*}}{\exp\left(\frac{zm}{k}\right)}. \qquad (5)$$

Коэффициент диффузии сероводорода в воде рассчитывали по уравнению из [2]:

$$D_{H_2S}=\frac{10^{-6}}{AB\sqrt{\mu}\left(\upsilon_{H_2S}^{1/3}+\upsilon_{H_2O}^{1/3}\right)^{2}}\sqrt{\frac{1}{M_{H_2S}}+\frac{1}{M_{H_2O}}}, \qquad (6)$$

где A,B – коэффициенты, зависящие от диффундирующего компонента и среды [2]; M – молекулярная масс, кг/кмоль.

Критерий Нуссельта в жидкости рассчитывали по уравнению из [2]:

$$Nu=0{,}0021\cdot\mathrm{Re}^{0{,}75}\cdot\mathrm{Pr}^{0{,}5}. \qquad (7)$$

Критерий Рейнольдса

$$Re=\frac{4L}{Sa\psi\mu_{ж}}, \qquad (8)$$

где L – расход жидкости, *кг/с*; S – площадь поперечного сечения колонны, *м^2*; ψ – коэффициент смачиваемости; $\mu_{ж}$ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Критерий Прандтля

$$\mathrm{Pr}=\frac{\mu_{ж}}{\rho\cdot D_{H_2S}}, \qquad (9)$$

где ρ – плотность жидкости, *кг/м^3*; D – коэффициент диффузии.

Приведенная толщина жидкой пленки

$$\delta=\left(\frac{\mu_{ж}^{2}}{\rho_{ж}^{2}g}\right)^{1/3}, \qquad (10)$$

где g – ускорение свободного падения, *м/с^2*.

Коэффициент массоотдачи рассчитывали по уравнению

$$\beta_{ж}=\frac{D_{H_2S}\cdot Nu}{\delta}. \qquad (11)$$

Расчет удельной поверхности насадки *a* состоит в следующем. Принимается угол сгиба ленты α равным 90°. Высота волны ленты *h*, м (рис. 2).

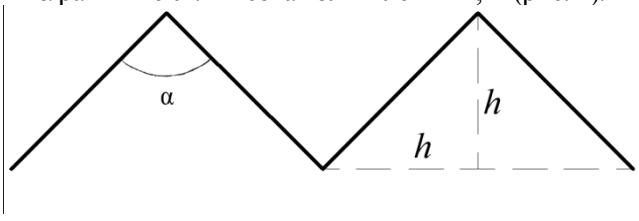


Рис. 2. К расчету поверхности ленточной насадки

Длина одной волны равна 2*h*. Учитываем, что смачивается только верхняя поверхность ленты, площадь которой составит

$$f=cs\sqrt{2}, \qquad (12)$$

где *c* – длина ленты, *м*; *s* – ширина ленты, *м*.

Суммарное число лент в слое насадки

$$N=\frac{bH}{4sh}, \qquad (13)$$

где b – ширина слоя лент, *м*; H – суммарная высота слоя насадки, *м*.

Суммарная смачиваемая поверхность слоя насадки

$$F = fN = \frac{\sqrt{2}V}{4h}, \qquad (14)$$

где V – объем слоя насадки, $м^3$.

Удельная поверхность слоя насадки

$$a = \frac{F}{V} = \frac{\sqrt{2}}{4h}. \qquad (15)$$

Используя приведенную выше методику расчета, проведем сравнительный анализ эффективности применения используемой и предлагаемой насадки в процессе десорбции сероводорода из воды.

Расчеты выполнены для следующего режима: расход жидкости 50 $м^3$/ч, начальная концентрация сероводорода в жидкости 0,118 кмоль/$м^3$ (4 кг/$м^3$), конечная – 0,00115 кмоль/$м^3$ (0,038 кг/$м^3$), внутренний диаметр аппарата 1,6 м, растворимость сероводорода в воде при 20 °С и 1 ат 0,00115 кмоль/$м^3$ [1], коэффициент диффузии сероводорода в воде при этих же условиях $1{,}93 \cdot 10^{-9}$ $м^2$/с, динамическая вязкость жидкости $0{,}958 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение концентрации сероводорода по высоте слоя насадки

Высота слоя насадки, *м*	Концентрация, *кмоль/м³* (Ленточная насадка)	Концентрация, *кмоль/м³* (кольца Рашига)
1	0,037332	0,023755
2	0,012388	0,005536
3	0,004640	0,002001
4	0,002234	0,001315
5	0,001487	0,001182
6	0,001255	0,001156
7	0,001183	0,001151
8	0,001160	0,001150
9	0,001153	0,001150
10	0,001150	0,001150

Как видно из предоставленного результата расчетов, предлагаемая насадка незначительно уступает применяемой в настоящее время на производстве (кольца Рашига), однако существенно экономит затраты материалов на изготовление слоя насадки. Ранее было указано, что для изготовления слоя насадки, состоящего из колец Рашига (50×50×1) объемом 1 $м^3$, затрачивается 430 кг стали, в то время как на изготовление слоя ленточной насадки того же объема затрачивается около 120 кг, т. е. расход материала снижается более чем в 3 раза. И это при исполнении лент насадки из металла хотя, как было указано ранее, ленты в данной насадке могут быть выполнены из пластика или химически и механически стойкой ткани.

Также сравнительный анализ такого показателя, как удельный свободный объем, показывает преимущество предлагаемой насадки перед используемой. Удельный свободный объем регулярной насадки составляет 0,985 $м^3/м^3$, в то время как удельный свободный объем колец Рашига в данном исполнении составляет 0,945 $м^3/м^3$. Данный показатель непосредственно влияет на гидравлическое сопротивление слоя насадки.

Ленты насадки могут принимать различную форму: такую, как показано на рис. 1, а также трапециевидную или волнообразную. Целесообразно между вертикальными рядами лент устанавливать вертикальные плоские листы сеток. При этом изменится характер взаимодействия потоков газа и жидкости на насадке. При перетекании потока жидкости с одной ленты на другую она будет проходить через сетку, разбиваясь на струи. Это позволит увеличить поверхность контакта фаз в слое насадки. В этом случае рабочей окажется и нижняя поверхность лент, которая будет смачиваться образующимися струями.

На представленную конструкцию ленточной насадки и на способ изготовления насадки поданы заявки на изобретения [3, 4].

На основании представленных результатов моделирования можно сделать вывод, что предложенная насадка является эффективной и конкурентоспособной в сравнении с другими известными типами насадок. Основное преимущество данной насадки состоит в снижении затрат дорогостоящих материалов на ее изготовление и снижении веса конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перри Дж. Справочник инженера-химика. – Т. 1. – Л. : Химия, 1969. – 640 с.
2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л. : Химия, 1976. – 552 с.
3. Бальчугов А. В., Скачков И. В., Кузора И. Е. Регулярная насадка для массообменных аппаратов // Заявка на изобретение. № 2011112698.
4. Бальчугов А. В., Скачков И. В., Кузора И. Е. Способ изготовления регулярной насадки для массообменных аппаратов // Заявка на изобретение № 2011112700.

УДК 681.3.06

Корсуков Александр Сергеевич,
канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН
тел.: 65-04-04, e-mail: alexask@mail.ru

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

A.S. Korsukov

TOOLS FOR SEMINATURAL SIMULATION OF DISTRIBUTED COMPUTING SYSTEMS

Аннотация. *Обсуждаются вопросы, связанные с эффективностью управления потоками заданий в распределенных вычислительных системах. В частности, рассматриваются инструментальные средства, предназначенные для автоматизации моделирования потоков заданий в кластерной Grid.*

Ключевые слова: *распределенные вычисления, Grid, потоки заданий, моделирование, инструментальные средства.*

Abstract. *The questions connected to the effectiveness of task flows in distributed computing systems are discussed. Specifically, the tools designed to automate the simulation of task flows in a cluster Grid are considered.*

Keywords: *distributed computing, Grid, task flows, modeling tools.*

Введение

В последние годы активно развиваются технологии организации распределенной обработки информации и высокопроизводительных вычислений. Одним из ярких примеров является технология Grid, которая предоставляет возможность интеграции географически распределенных вычислительных и информационных ресурсов глобальных сетей для решения ресурсоемких вычислительных задач. Сложность динамической структуры Grid, обусловленная организационной и функциональной разнородностью интегрируемых информационно-вычислительных ресурсов и разнообразием спектра решаемых с помощью этих ресурсов задач, приводит к необходимости всестороннего исследования ее инфраструктуры с целью наиболее эффективной реализации вычислений. В этой связи важной и практически значимой задачей становиться моделирование процессов распределения и обработки в Grid потоков заданий по решению задач различных классов.

Известные в настоящее время средства моделирования процессов функционирования Grid, такие как MicroGrid [1], OptorSim [2], SimGrid [3], программа моделирования системы диспетчеризации метапланировщика Gridway [4] и другие системы, зачастую позволяют получить лишь наиболее общие, ориентировочные результаты. В этом случае для определения окончательной конфигурации проектируемой Grid целесообразно проведение экспериментальных исследований и натурных испытаний в реальном режиме времени, представляющих наибольший интерес с точки зрения достоверности получаемых результатов. Однако существующее программное обеспечение экспериментальных исследований с Grid, например пакеты для тестирования произ-водительности вычислительных систем (см., например, обзорные работы [5], [6]), как правило, не предназначены для оценки эффективности управления потоками заданий в этих системах и не применимы в разнородных вычислительных средах.

В статье рассматриваются инструментальные средства, предназначенные для автоматизации моделирования потоков заданий в Grid. Отличительными особенностями этих средств являются: представление организационно-функциональной инфраструктуры Grid в виде стохастической динамической вычислительной сети, состояние которой в некоторый момент времени определяется распределением в ней потоков заданий; моделирование потоков заданий различных типов; автоматизация подготовки и проведения полномасштабного физического моделирования Grid.

Поток заданий

Задание пользователя представляет собой спецификацию процесса решения задач, содержащую информацию о необходимых вычислительных ресурсах, исполняемых прикладных программах, входных/выходных данных и т. п. Множество заданий пользователя, поступающих в Grid с его

машины, составляет поток заданий, который в дальнейшем может сливаться с потоками заданий других пользователей, образуя новые потоки (рис. 1).

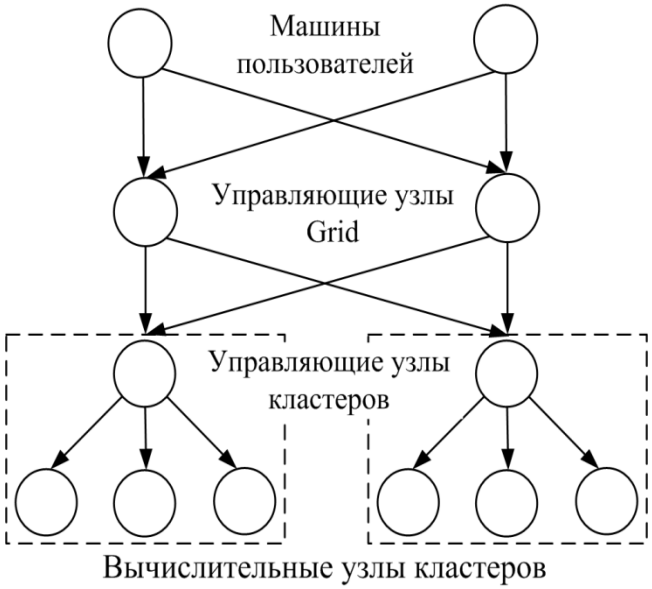


Рис. 1. Информационный граф, отображающий потоки заданий в Grid

Поток заданий в Grid характеризуется следующими свойствами: динамичностью (мощность и состав потока заданий изменяется во времени); стохастичностью (поток заданий предполагает возникновение случайных событий); неоднородностью (задания соответствуют разным классам задач и отличаются друг от друга по своей специфике); отсутствием обратной связи (число заданий, поступивших за один промежуток времени, не зависит от числа заданий, поступивших за другой промежуток времени); неординарностью (возможно поступление двух и более заданий в один и тот же момент времени); стационарностью (число событий, поступивших за определенный промежуток времени, зависит от длины этого промежутка и не зависит от момента его начала).

Задание потока попадает в вычислительный узел кластера только через систему управления прохождением задач (СУПЗ), установленную на управляющем узле этого кластера. Такое прохождение задач (включая задачи локальных пользователей узлов данной системы) обеспечивает децентрализованным системам управления вычислительными процессами поддержку единой, целостной информационной картины, складывающейся в процессе вычислений.

Оценка эффективности планирования потоков заданий осуществляется с позиции теории очередей. При нахождении этой оценки важную роль играют следующие показатели эффективности функционирования вычислительных ресурсов Grid: число заданий с нулевым временем ожидания, среднее время ожидания задания в очереди, среднее число заданий в очереди, среднее время пребывания задания в Grid, коэффициент полезного использования ресурсов, количество заданий в потоке, общее время решения заданий потока и ряд других характеристик очередей заданий.

Моделирование функционирования Grid выполняется на основе синтетических потоков заданий. Под синтетическим потоком заданий понимается искусственно сгенерированный поток, где в качестве приложений в заданиях используются программы-имитаторы, выполняющие в Grid реальную загрузку вычислительных ресурсов и обмен заданными объемами данных.

Для описания синтетического потока заданий используется стандартизированный формат workload [7], который включает две основные группы параметров. Первая группа содержит набор параметров потока, например общее количество заданий в потоке, максимально разрешенное время выполнения задания и др. Вторая группа содержит 18 опции заданий, например уникальный номер задания, время запуска и выполнения задания и т. д. На основе формата workload был разработан ряд моделей потоков заданий [8], однако такие модели являются узкоспециализированными и не могут быть использованы для конкретной конфигурации вычислительной системы.

Инструментальные средства полунатурного моделирования Grid

Инструментальный комплекс DISCENT [9] используется для организации Grid с целью решения разнотипных ресурсоемких научно-исследовательских задач. Данный комплекс включает средства полунатурного моделирования вычислительной инфраструктуры Grid путем генерации синтетических потоков заданий с целью оценки эффективности ее функционирования.

Генератор синтетического потока заданий представляет собой скрипт языка PHP, функционирует на произвольной рабочей станции с выделенным IP-адресом и осуществляет запуск заданий либо с помощью утилит пакета Globus Toolkit [10], либо средствами инструментального комплекса DISCENT. Генератор включает следующие компоненты (рис. 2): интерфейс, модуль формирования заданий, планировщик, диспетчер запуска заданий и информационную подсистему.

Интерфейс предоставляет пользователю средства для спецификации заданий-тестов и получения информации (статистики) о ходе выполнения заданий. Спецификация задания-теста

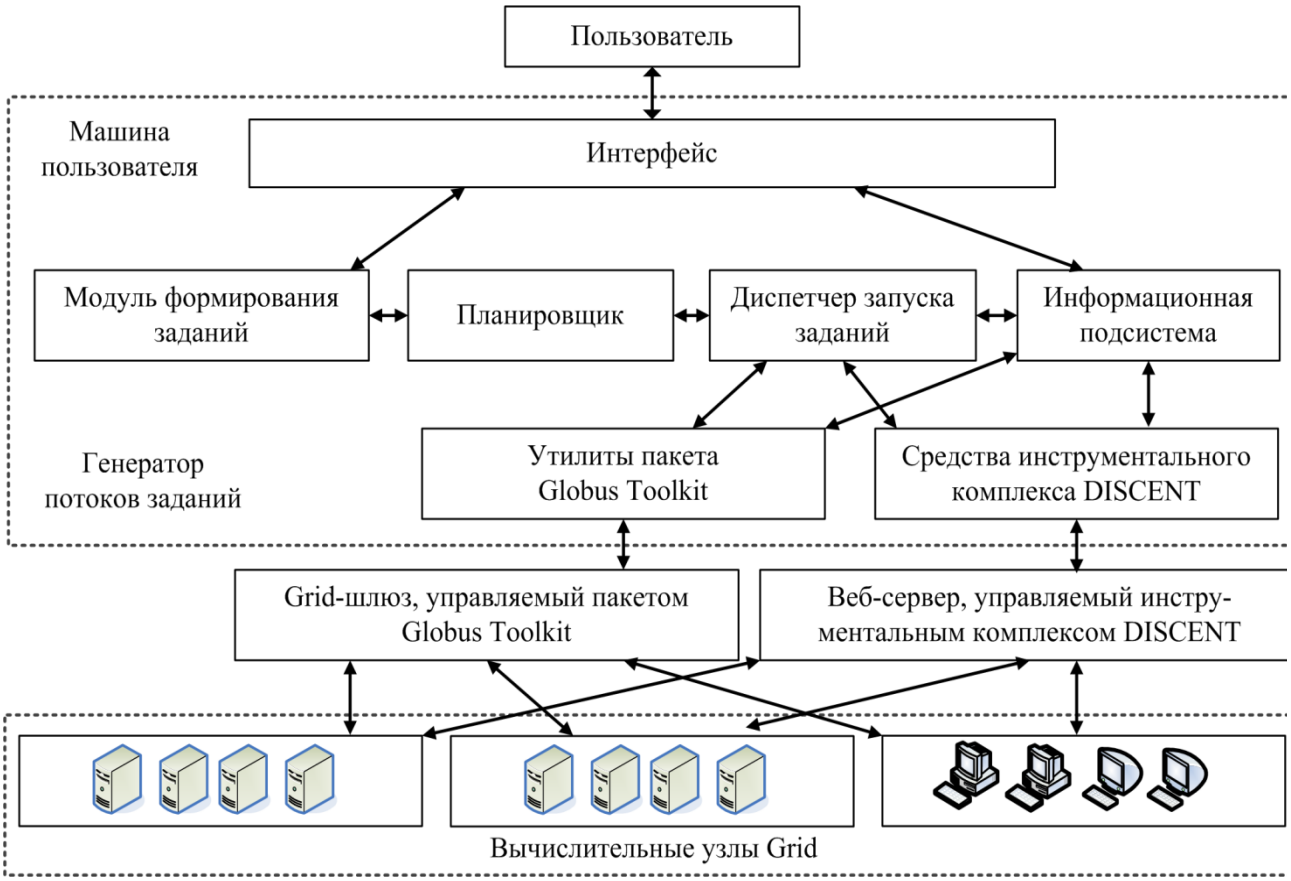


Рис. 2. Архитектура генератора

включает: систему планирования заданий; общее количество заданий в потоке; количество заданий определенного типа в потоке; законы вероятностного распределения времени отправки заданий определенного типа в Grid; опции задания (тип задания, время выполнения задания, размеры файлов данных, системные требования к ресурсам Grid, приоритет выполнения задания и др). В текущей версии генератора при указании в спецификации задания-теста системы планирования заданий предполагается, что в качестве таких систем в Grid используются планировщик GridWay пакета Globus Toolkit и система планирования инструментального комплекса DISCENT. Значения параметров потока заданий, опции и спецификации заданий определяются пользователем с помощью интуитивно-понятного веб-интерфейса. Выбранные значения сохраняются в текстовом файле в формате workload.

Модуль формирования заданий автоматически создает специальные приложения (программы-имитаторы), используя установленные пользователем опции заданий-тестов, конвертирует спецификации заданий-тестов из формата workload в формат, используемый СУПЗ вычислительных узлов Grid, и передает конвертированные спецификации планировщику.

Планировщик работает в фоновом режиме и выполняет формирование и обслуживание очередей заданий-тестов. В соответствии с заданным принципом обработки очередей и временем запуска задания-теста, указанном в его спецификации, планировщик передает данное задание на выполнение диспетчеру заданий.

Диспетчер заданий осуществляет запуск заданий-тестов с помощью программных комплексов, указанных в спецификациях заданий.

Информационная подсистема предназначена для сбора и обработки статистических данных о процессах выполнения заданий-тестов в Grid с помощью информационных служб программных комплексов Globus Toolkit или DISCENT. На основе полученной информации производится оценка показателей эффективности функционирования Grid, которые были определены ранее.

Вычислительный эксперимент

Проведение эксперимента выполнялось в Grid ИДСТУ СО РАН, совокупная мощность которой представлена тремя кластерами с различ-

ными программно-аппаратными платформами (табл. 1).

Таблица 1

	Кол-во вычислительных узлов	Кол-во процессоров	Кол-во ядер	Используемая ОС
кластер 1	20	40	160	Linux
кластер 2	8	8	16	Linux
кластер 3	16	16	32	Windows

Для формирования синтетических потоков использовались задачи различных типов: стандартные задачи – скомпилированные программы пользователей, для выполнения которых используется штатный набор функций СУПЗ; многовариантные задачи, для решения которых необходимо выполнение программы с различными наборами данных; задачи, в которых требуется выполнение приложений, размещенных в узлах Grid; взаимосвязанные задачи, требующие выполнения набора взаимозависимых заданий, включенных в процесс решения одной общей задачи.

Процесс выполнения заданий в Grid происходит поэтапно (табл. 2). Основными этапами моделирования процессов функционирования Grid являются:

1) подготовка исходных данных необходимых заданию при его выполнении;

2) формирование спецификации процесса решения задачи, включающей информацию о прикладной программе, ее входных/выходных данных и др.;

3) отправка задания в Grid с помощью специальных утилит промежуточного программного обеспечения;

4) поиск свободного кластера системой планирования Grid и передача поступившего задания на управляющий узел выбранного кластера;

5) постановка задания в очередь СУПЗ кластера;

6) выполнение задания на свободных вычислительных ресурсах и передача результатов счета на машину, с которой производился запуск;

7) сбор статистических данных из лог-файлов выполнения заданий и работы планировщиков СУПЗ;

8) анализ данных и расчет основных статистических показателей, с помощью которых можно оценить работу Grid.

Генератор потоков заданий позволяет существенно уменьшить время, затрачиваемое при проведении неавтоматизированного моделирования на этапах 1, 2, 7 и 8.

Для получения данных о времени, затраченном на проведение автоматизированного моделирования, было выполнено три эксперимента с использованием различных кластеров, разным количеством и типами заданий в потоке (табл. 3).

Зададим время моделирования выполнения i-го задания r-го типа, следующим соотношени-

Таблица 2

Этапы	Тип задания	T, неавтоматизированное моделирование	$\hat{T}$, автоматизированное моделирование
Подготовка исходных данных	Стандартное задание	10–120 сек	1–2 сек
	Многовариантное задание	n x (10–120 сек)	n x (1–2 сек)
	Взаимосвязанное задание	m x (10–120 сек)	m x (1–2 сек)
Формирование паспорта задания	Стандартное задание	10–120 сек	1–2 сек
	Многовариантное задание	10–300 сек	1–4 сек
	Взаимосвязанное задание	10–600 сек	1–4 сек
Сбор данных	Стандартное задание	10–40 сек	1–2 сек
	Многовариантное задание	10–120 сек	1–2 сек
	Взаимосвязанное задание	10–100 сек	1–2 сек
Анализ данных	Стандартное задание	10–30 сек	1–2 сек
	Многовариантное задание	10–90 сек	1–4 сек
	Взаимосвязанное задание	10–120 сек	1–4 сек

Таблица 3

	Вычислительные ресурсы	Общее количество заданий	Типы заданий
Эксперимент 1	Кластер 1 и кластер 2	18688	Все типы задач
Эксперимент 2	Кластер 1 и кластер 3	9344	Все типы задач
эксперимент 3	Все кластеры	157	Многовариантные задачи (100 вариантов) и взаимозависимые задачи (50 подзадач)

ем: $t_i^r = \tau_i^r + \eta_i^r + \mu_i^r + \varphi_i^r$, где τ_i^r – время, необходимое для подготовки исходных данных для i-го задания r-го типа; η_i^r – время формирования паспорта i-го задания r-ого типа; μ_i^r – время сбора данных о выполненном i-ом задании r-го типа; φ_i^r – время анализа данных i-ого задания r-го типа. Тогда оценку времени, затрачиваемого на моделирование выполнения заданий r-го типа из потока, содержащего k_r заданий, определим как $\hat{t}_i^r = \frac{1}{k_r} \times \sum_{i=1}^{k_r} t_i^r$, а оценку времени, затраченного на проведение моделирования, зададим как $\hat{T} = \sum_{r=1}^{N} \hat{t}^r$.

В табл. 2 приведены оценки времени, затрачиваемого соответственно на неавтоматизированное и автоматизированное моделирование потоков заданий разных типов. Здесь n – количество вариантов многовариантного задания, m – количество подзадач во взаимосвязанном задании. Данные оценки получены эмпирическим путем при проведении ряда крупномасштабных экспериментов [11].

В табл. 4 и на рис. 3 представлена информация о подготовке исходных данных и обработке полученных результатов моделирования потоков заданий.

Таблица 4

Этапы	Оценка времени для проведения неавтоматизированного моделирования (сек)			Время для проведения автоматизированного моделирования (сек)		
№ эксперимента	1	2	3	1	2	3
Подготовка исходных данных	561846	53359	278350	26435	173700	16497
Формирование паспорта задания	373286	24446	184933	12111	115405	7558
Сбор данных	117087	21506	58007	10654	36199	6649
Анализ данных	404268	25451	200282	12609	124983	7869
Итого	1456486	124762	721572	61810	450288	38571

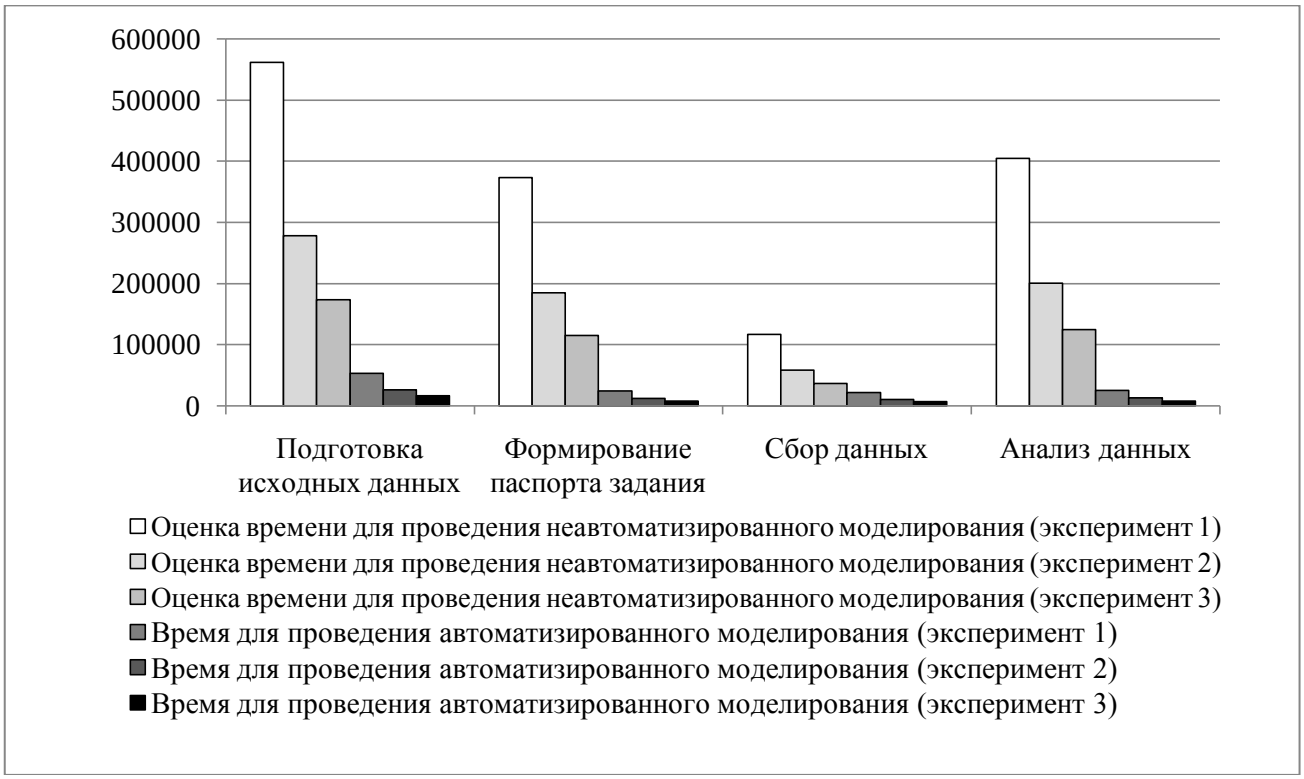


Рис. 3. Результаты моделирования потоков заданий

Полученные результаты показывают, что использование генератора потоков заданий позволяет существенно сократить время моделирования.

Заключение

Представленные в статье инструментальные средства обеспечивают автоматизацию процессов моделирования потоков заданий и тем самым позволяют существенно ускорить подготовку и проведение физических экспериментов по оценке эффективности функционирования Grid.

Данные инструментальные средства прошли успешную проверку при исследовании экспериментальной кластерной Grid Института динамики систем и теории управления СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Xia H., Dail H., Casanova H., Chien A. The Microgrid : Using Emulation to Predict Application Performance in Diverse Grid Network Environments // In Proceedings of the Workshop on Challenges of Large Applications in Distributed Environments (CLADE'04). – IEEE Press. – 2004. – P. 52–61.
2. Bell W., Cameron D., Capozza L. Optorsim – a Grid Simulator for Studying Dynamic Data Replication Strategies // International Journal of High Performance Computing Applications. – 2003. – Vol. 17, no. 4. – P. 403–416.
3. Legrand A., Marchal L., Casanova H. Scheduling Distributed Applications : The simgrid simulation framework // Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid 2003 (CCGrid2003). – 2003. – P. 138–145.
4. Васенин В. А., Сериков Д. А. Математическое обеспечение эффективного разделения ресурсов для решения задач на распределенной вычислительной среде // Проблемы информатики. – 2009. – № 2. – С. 10–21.
5. Воеводин В., Воеводин В. Параллельные вычисления. – СПб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
6. Kotsis G., Pfneiszl, H. Benchmarking Parallel Processing Systems – a Survey // Distributed Systems. – University of Vienna, 1996. – P. 1–11
7. Chapin S., Benchmarks and Standards for the Evaluation of Parallel Job Schedulers / Feitelson D. and Rudolph L. // Job Scheduling Strategies for Parallel Processing – Springer-Verlag, 1999, Lect. Notes Comput. Sci. vol. 1659. – P. 66–89.
8. Parallel Workload Models [Электронный ресурс]. – URL : www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/models.html (дата обращения 22.08.2011).
9. Бычков И. В., Корсуков А. С., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г. Инструментальный комплекс для организации гетерогенных распределенных вычислительных сред // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – № 1. – С. 45–54.
10. Foster I. Globus Toolkit Version 4 : Software for Service-Oriented Systems // IFIP Intern. Conf. on Network and Parallel Computing. – Springer. – 2006. – P. 2–13.
11. Бычков И. В., Корсуков А. С., Опарин Г. А., Феоктистов А. Г. Технология организации гетерогенных распределенных вычислительных сред // Научный сервис в сети Интернет : масштабируемость, параллельность, эффективность : тр. Всерос. суперкомпьютерной конф. – М. : Изд-во МГУ, 2009. – С. 353–359.

УДК 681.5.011

Наумов Игорь Сергеевич,
аспирант Пермского государственного технического университета,
тел.: (342)-219-80-11, e-mail: igor14-88@list.ru

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ

I.S. Naumov

STATEMENT OF PROBLEM OF SUPPLY OF RESOURCES SYSTEM OPTIMIZATION PARAMETERS AT LIQUIDATION OF EMERGENCY ON INDUSTRIAL TARGETS

Аннотация. *Обосновывается необходимость проведения предварительной оценки затрат на систему обеспечения ресурсами. Описана модель для оценки возможного ущерба от чрезвычайной ситуации при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации.*

Ключевые слова: *управление, ресурс, чрезвычайная ситуация, ликвидация, моделирование, ущерб.*

Abstract. *Necessity of carrying out a tentative estimation of expenses for a supply by resources system is proved. The model for an estimation of a possible damage from an emergency in the absence of maintenance with resources of process of its liquidation is described.*

Keywords: *governance, resource, emergency, recovery, modelling, damage.*

Своевременная локализация и ликвидация чрезвычайных ситуаций (ЧС) является одной из центральных проблем нашей цивилизации. Рост масштабов хозяйственной деятельности и бурное развитие научно-технической революции привели к росту количества и масштабов возникающих ЧС. При этом их частота возрастает с ростом темпа производственной деятельности человека.

Для устойчивого развития любого предприятия и страны в целом необходимо принятие мер по сокращению ущерба, причиняемого ЧС, и количества ресурсов, используемых при его предупреждении и ликвидации. Однако опасные природные и техногенные явления как источник ЧС могут прогнозироваться лишь на очень малых с точки зрения проведения превентивных мероприятий временных интервалах. Это приводит к необходимости использования в качестве исходных данных частот этих событий.

Необходимо совершенствование систем управления, ориентированных на локализацию и ликвидацию ЧС. Это совершенствование может обеспечиваться следующими параметрами: обоснованием производительности оборудования; обоснованием средств, необходимых для содержания личного состава и его оснащения; обоснованием структуры систем локализации и ликвидации ЧС.

Основными критериями формирования оптимального плана по предупреждению и ликвидации последствий ЧС являются: минимум ущерба; минимум общих затрат на реализацию превентивных мероприятий; минимум общего времени реализации оперативных мероприятий по ликвидации ЧС и ее последствий. Ставятся ограничения на общие объемы ресурсов, сил и средств, выделенных для реализации мероприятий, на наличие необходимых сил и средств в пунктах их дислокации, структурные ограничения на связи ЧС и проводимых мероприятий и другие.

Для разработки модели оценивания влияния значений параметров системы обеспечения ресурсами на результаты ликвидации ЧС необходимо определить взаимоотношение основных параметров системы, которое позволит осуществить математические постановки задач оптимизации параметров системы обеспечения ресурсами.

Рассмотрим систему, состоящую из N пространственно распределенных объектов, на кото-

рых с вероятностью $P_i(i=\overline{1,N})$ могут возникнуть чрезвычайные ситуации.

Чрезвычайная ситуация на *i*-м объекте может быть локализована и ликвидирована в течение времени τ_i. В течение времени $\tau^{\max}=\max\{\tau_i\}$ возможно одновременное развитие ЧС на множестве объектов $\{\Omega\}$ с вероятностью P^{Ω}. Имеется дорожная сеть, соединяющая объекты. Для локализации и ликвидации ЧС выделены ограниченные финансовые средства C_Σ, на которые для *i*-х объектов можно закупить x_{ij} ресурсов из V типов агрегатов, отличающихся по стоимости $\left(C_j, j=\overline{1,V}\right)$ и производительности π_j. Чрезвычайную ситуацию на i-м предприятии можно локализовать в течение времени τ_i, причем чем позже начинаются мероприятия по локализации ЧС $(\tau_i^{'}=\tau_i-\tau_i^{начала})$ (при одной и той же производительности оборудования и одинаковом его количестве), тем больше будет ущерб от ЧС. Количество агрегатов, которые одновременно можно использовать на объекте для локализации ЧС, ограничено $\left(x_i^{\max}\right)$.

Необходимо определить рациональную величину средств (C_Σ), оптимальные состав и количество агрегатов и их оптимальное распределение между объектами, обеспечивающее минимальный ущерб от ЧС, если общий ущерб от ЧС на *i* объектах равен сумме ущербов на каждом из *i* объектов.

Ввиду того, что ущерб от чрезвычайных ситуаций на объектах равен сумме ущербов на каждом объекте, финансовые средства, выделенные на локализацию и ликвидацию ЧС, равны сумме средств, выделенных для каждого объекта.

Закон распределения вероятности возникновения ЧС на *i* объектах в течение времени $\tau^{\max}$ равен *i*-й кратной свертке законов распределений.

Предположим, что предотвращаемый ущерб от чрезвычайных ситуаций пропорционален производительности и располагаемому времени ликвидации ЧС, однако ввиду того, что одновременно возможно применение ограниченного количества агрегатов и располагаемое время ограничено, предотвращаемый ущерб ограничен.

Для математической постановки задач оптимизации необходимо определить переменные, взаимосвязь которых рассматривается в модели.

Количество пространственно распределенных объектов N зависит от соотношения времени движения и располагаемого времени.

Граф дорожной сети $G(L,K)$ задается матрицей инциденций $\left\|\tau_{(l,k)}^{G}\right\|$; $l\in L$; $k\in K$; $i=\overline{1,N}$; $k=\overline{1,N}$ (матрицей времени движения), значения параметров дуг определяют время движения по этой дуге и измеряются в единицах времени.

Матрица времени движения определяется из соотношения расстояния до объекта и скорости движения средств доставки ресурсов, обеспечивающих ликвидацию ЧС на объекте.

Матрица вероятностей ЧС на объектах $\|P_i\|$ определяется расчетным методом и уточняется по результатам эксплуатации аналогичных объектов.

С учетом допущения о том, что предотвращаемый ущерб пропорционален времени использования ресурсов, а общая производительность предотвращения ущерба равна сумме производительностей отдельных ресурсов, общий предотвращаемый ущерб равен

$$U_i=\sum_j x_{ij}\pi_j\tau_i.$$

Производительность ресурсов на i-м объекте

$$П_i=\sum_j x_{ij}\pi_j,$$

где $\|U_i\|$ − матрица ущербов от чрезвычайных ситуаций на объектах, определяется расчетным методом и уточняется по результатам ущербов от ЧС на аналогичных объектах, измеряется в денежных единицах; $\|x_{ij}\|$ − матрица количества агрегатов *j*-го типа; $\|\pi_j\|$ − матрица производительностей агрегата *j*-го типа (измеряется в единицу стоимости в единицу времени); $\|\tau_i\|$ − интервал времени развития процесса ЧС, в течение которого можно еще ликвидировать ЧС на *i*-м объекте и предотвратить максимальный ущерб (требуемое время). По истечении этого времени что-либо делать поздно, можно лишь ликвидировать последствия.

Если располагаемое время меньше требуемого времени (оно зависит от производительности и допустимого ущерба), то необходимо стремиться к размещению на объектах части ресурсов, которые уменьшают скорость развития ЧС. Прибытие ресурсов с центральной базы и с объектов, на

которых в течение до $\tau_{\max}$ не может возникнуть чрезвычайная ситуация, позволяет обеспечить требуемую эффективность функционирования системы. В этом случае непредотвращенный ущерб

$$U_{\Sigma} = \sum_{i\in\{\Omega\}} U_i^{\Sigma} \to \min;$$

$$U_i^{\Sigma} = U_i^{\max} - \left[\sum_{j=1}^{V} x_{ij}\pi_j\tau_i + \right.$$

$$\left. + \sum_{\substack{\forall k: k\neq i \\ \forall k: k\notin\{\Omega\} \\ \forall k: \tau_{ДВk_i} < \tau_i}} \sum_{j=1}^{V} x_{kj}\pi_j\left(\tau_i - \tau_{ДВk_i}\right) + \sum_{j=1}^{V} x_i\pi_j\left(\tau_i - \tau_{ДВЦi}\right) \right],$$

где $U_i^{\max}$ – максимальный ущерб на i-м объекте в результате ЧС; V – количество типов ресурсов для ликвидации ЧС.

Стоимость ресурсов для ликвидации ЧС на *i*-м объекте выражается суммарной стоимостью ресурсов всех типов:

$$C_i = \sum_j C_j x_{ij},$$

где $\|C_j\|$ – матрица стоимостей j-го типа ресурса, $j = \overline{1, L}.$ Возможны однотипные ресурсы, но отличающиеся по стоимости.

Первоначально необходимо провести предварительную оценку общих затрат на систему обеспечения ресурсами. Это обеспечивает исходную информационную основу для последующей оптимизации параметров системы. Для этого оценивается средний суммарный возможный ущерб от чрезвычайной ситуации при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации. Выражение этого ущерба сопоставляется с объективными потребностями в ресурсах на предотвращение ожидаемого ущерба. Полученное выражение потребности в ресурсах приводится к форме затрат на их приобретение. Решение этой задачи не требует использования сложных формальных методов и базируется на известных моделях развития ЧС, применяемых в отношении конкретных промышленных объектов, данные о которых могут определяться по паспортам этих объектов. Кроме того, используются известные сведения о затратах на приобретение и ввод в эксплуатацию всех доступных видов ресурсов, а также об их производительности. Эти сведения могут быть конкретизированы для объектов, так как производительность и стоимость размещения ресурсов на различных объектах может различаться. Полученные результаты ложатся в информационную основу для выработки решений об определении размера бюджетного финансирования на создание или совершенствование системы ликвидации ЧС и позволяют выработать предварительное заключение о степени совершенства существующей системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концепция создания Единой автоматизированной системы антикризисного управления жизнедеятельностью государства в условиях повседневной деятельности, предупреждения и ликвидации ЧС. – М. : МЧС, 2008. – 137 с.
2. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций. – М. : Советское радио, 1964. – 391 с.
3. Цвиркун А. Д., Акинфиев В. К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. М. : Наука, 1993. – 160 с.

УДК 681.325

Мухопад Александр Юрьевич,
канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры «Управление техническими системами» ИрГУПС,
тел.: 89021754553, e-mail: jcmG@mail.ru
Мухопад Юрий Федорович,
д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ИрГУПС,
тел.: 89500500291, e-mail: bts48@mail.ru

ДИНАМИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ АВТОМАТОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

A.U. Mukhopad, U.F. Mukhopad

THE DYNAMIC CONTROL OF AUTOMATIC MACHINES OF MANAGEMENT TECHNOLOGICAL PROCESSES

Аннотация. *Проводится системный анализ методов динамического контроля автоматов управления технологическими процессами. Приведён пример синтеза схем для самоконтроля, при котором эффективность автомата достигается применением мультиплексора для выбора единственного логического условия из всего множества входных сигналов.*

Ключевые слова: *автомат, управление, контроль, мультиплексор, синтез автоматов.*

Abstract. *The system analysis of the dynamic control of automatic machines of technological processes management methods is described. The example of synthesis of schemes for self-checking which efficiency of the automatic machine is resulted reached by application of the multiplexer for a choice of a unique logic condition from all set of entrance signals.*

Keywords: *the automatic machine, management, the control, the multiplexer, synthesis of automatic machines.*

Автоматы управления в специализированных информационно-управляющих системах (ИУС) реального времени могут составлять до 50 % оборудования при аппаратной реализации. От исправного функционирования управляющей подсистемы зависит корректность результатов и правильность выдачи команд управления. Поэтому контроль автоматов исключительно важен для ИУС, работающих в экстремальных условиях (вибрации, повышенная температура, электромагнитные и радиационные воздействия). В данной статье анализ и синтез контроля будет рассматриваться в плане динамического (оперативного) контроля автоматов во время функционирования, без изучения вопросов тестового (предстартового) контроля.

Динамический контроль автоматов управления имеет три составляющие:

1) контроль входных переменных, которые для автоматов чаще называются логическими условиями $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_q$;
2) контроль переходов из настоящего состояния a(t) в последующее a(t+1);
3) контроль выходных команд A(t).

Для управления технологическими процессами наиболее применимы автоматы Мура, для которых аналитическая запись переходов и выходов имеет вид

$$a(t+1)=F_1\,(a(t), \alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_q);\ A(t)=F_2\,(a(t)),$$

где F_1 и F_2 булевы функции. Для автоматов Мура функции F_1 реализуются с помощью ПЗУ или ПЛМ. Поскольку для автоматов Мура команды A(t) формируются объединением по «ИЛИ» выходов от дешифратора кода a(t), соответствующих одним и тем же $A_j \in \{A\}$, то контроль автоматов по пункту 3 не представляет самостоятельной задачи. Для автоматов Мура наиболее актуален контроль правильности вычисления кода – $y_1, y_2, \ldots, y_m$ по конкатенации $\alpha_1, \alpha_2, \ldots \alpha_q, x_1, x_2, \ldots, x_m$, где {x} и {y} – коды a(t) и a(t+1).

Контроль входных переменных связан с обнаружением и исправлением ошибок поступающих кодов. Это направление достаточно глубоко исследовано в теории передачи дискретной информации [1]. Поэтому первоначально был развит А.Д. Закревским метод Хемминга для контроля правильности переходов в автоматах [2]. Развитие этих методов применительно к дискретным устройствам рассмотрено в работах [3–5].

Близкой идеей является метод М.А. Гаврилова [7], основанный на проверке соблюдения расстояния (d) по Хеммингу при переходах $a(t) \rightarrow a(t+1)$. Однако ни метод М.А. Гаврилова, ни метод А.Д. Закревского не получили распространения, хотя и исследовались в работах [3, 5, 10,

40]. Вопросы встроенного контроля начали развиваться параллельно с созданием ЭВМ первых поколений [8–10], и, тем не менее, на сегодня не разработана единая теория контроля автоматов.

Существующие методы представляют собой набор некоторых эвристических находок или развитие идей кодирования. Поэтому в настоящей статье наряду с изложением нового метода контроля выполнен системный анализ основных публикаций по вопросам контроля автоматов.

Эти методы можно разделить на несколько направлений:

1) применение идей анализа результатов при многократных циклических переходах [11];
2) применение булевых функций [2] и теории грамматик для анализа поведения автомата [13, 17];
3) применение для контроля и диагностики сетей Петри с запрещающими дугами [18], которые позже стали называть joiner-сети [20], и методов анализа параллельных алгоритмов [19]. Методы эффективны при анализе взаимодействующих автоматов;
4) оригинальный подход В.Н. Балакина и В.В. Барашенкова [14, 15] по созданию параллельно работающего автомата для контроля основного. Метод сложен в реализации;
5) применение идеи добавления к коду состояния a(t) нескольких дополнительных разрядов, фиксирующих сумму «1» в коде a(t), или полное дублирование комбинационной схемы автомата [27, 38];
6) применение равновесных кодов (mCn), имеющих m единиц в n-разрядном коде [22–30];
7) повышение надёжности функционирования базовых элементов автоматов (триггеры, регистры, счётчики) за счёт контроля их состояния и введения элементов стабилизирующих состояние [39]. Этот метод требует специального исследования для задач контроля автоматов.

Проведённый анализ методов 1–7 позволяет сделать вывод о том, что метод 6 с равновесными кодами (mCn) наиболее прост в реализации и не уступает другим известным методам по уровню контролеспособности. Метод равновесных кодов был предложен для проектирования ПЗУ [22] и независимо для контроля автоматов [23–25]. Эти идеи были применены для автоматов в однородных средах [16] и развиты в работах [26, 27, 38].

Одной из разновидностей кода mCn является так называемый геометрический код [6, 22], который позволяет контролировать как ПЗУ [28], так и автоматы [29]. Модифицированный геометрический код (МГК) в отличие от кодов mCn наиболее прост для контроля, т. к. состоит из трёхразрядных групп (abc) с только одной «1» в группе; тогда для группы ошибка находится в виде

$$ERR = \overline{(\bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c})}.$$

Для снижения объёма ПЗУ (ПЛМ) при реализации F_1 состояние a(t+1) представляется в МГК, а a(t) в ДНК, где ДНК – двоичный непозиционный код [29]. ДНК получается переводом каждой группы МГК по правилу 001→00, 010→01, 100→10.

Для классических автоматов Мура способ контроля с использованием МГК и ДНК [36] имеет тот же уровень контролеспособности, что и метод mCn, но значительно проще в реализации как самой схемы F_1, так и средств контроля автомата.

В работах [31–37] предложен новый метод синтеза автоматов Мура, основанный на преобразовании алгоритма управления за счёт введения пустых операторов перед любым логическим условием, если к нему идёт передача управления от нескольких операторов. Пустой оператор ставится также в случае, если от одного логического оператора (α_j) управления передаётся другому логическому оператору α_j без промежуточных операторов действия A(t).

В этом случае каждому состоянию a(t) будет соответствовать проверка единого $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Тогда для каждого a(t) мультиплексором может быть выбрано именно ему соответствующее α_j ($j=\overline{1,q}$). При этом код a(t+1) через F_1 будет вычисляться не по конкатенации $\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_q, x_1, x_2, \ldots, x_m$, а по $\alpha_j, x_1, x_2, \ldots, x_m$. Объём ПЗУ (ПЛМ) для F_1 снизится в $Q = 2^{q-1}$ раз.

Аналитическая запись работы предложенного автомата [32] имеет вид:

$a(t+1) = F_1(a(t), \alpha_j)$; $A(t) = F_2(a(t))$; $j = F_3(a(t))$,

где j – номер $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Функция F_3 есть по существу простейшее устройство кодирования (перенумерации).

Сравнительный анализ и синтез таких автоматов приведён в [22–24]. Для классических автоматов объём ПЗУ составит $V = m2^{m+q}$, а для предложенных решений $V = m2^{m+1}$. Наиболее распространены автоматы с $m = 5$, $q = 12$, для которых $Q = 2048$ раз.

Новая структурная реализация автоматов позволяет предложить и новый подход к проверке правильности реализации переходов a(t)→a(t+1). Необходимость поиска новых методов определется тем, что метод МГК→ДНК обнаруживает одиночные и не обнаруживает двойные ошибки в группах кода МГК.

Пусть задана граф-схема алгоритма (ГСА)

$$A_0 \overset{2}{\downarrow}\overset{6}{\downarrow} A_1\overline{\alpha_1}\overset{1}{\uparrow} A_2\overline{\alpha_2}\overset{2}{\uparrow} A_3A_4A_5\overset{1}{\downarrow}\overset{3}{\downarrow} A_6A_7\overline{\alpha_3}\overset{3}{\uparrow}$$

$$A_8A_9A_{10}A_{11}A_{12}\overline{\alpha_4}\overset{4}{\uparrow}\overset{5}{\downarrow} A_{14}A_{15}A_{16}\alpha_5\overset{5}{\uparrow} A_{17}A_{18}A_{19}A_{20}\overline{\alpha_6}$$

$$\overset{6}{\uparrow}\overset{4}{\downarrow} A_{13}A_k,$$

которую преобразуем по методу работы [20] и перейдём к ЛСА. Здесь A_2 – пустой оператор. Граф переходов автомата, по которому составляется таблица переходов автомата представлен на рис. 1.

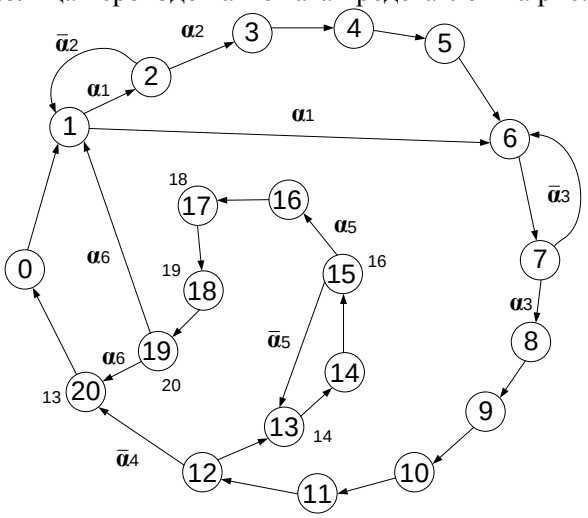


Рис. 1. Граф переходов автомата со счётчиком

Введём ещё одну схему вычисления y_1, y_2, …, y_m по конкатенации $\alpha_j, x_1, x_2, \ldots, x_m$ для которой разделим коды {x} и {y} на две части. При чётном m деление очевидно, а при нечётном осуществим так же деление на две части с «перекрытием» одного разряда (рис. 2).

α	$x_6x_5x_4$	$x_3x_2x_1$	α
	F_4	F_5	
α	$y_6y_5y_4$	$y_3y_2y_1$	α

а)

α	$x_5x_4x_3$	x_3	x_2x_1	α
	F_4		F_5	
α	$y_5y_4y_3$	y_3	y_2y_1	α

б)

Рис. 2 Разделение переменных для вычисления кода состояния автомата

Тогда булевы функции F_4 и F_3 в сумме будут значительно проще чем функция F_1. Однако при таком разделении при составлении таблиц соответствия $x_1x_2x_3 \xrightarrow{F_5} y_1y_2y_3$, $x_6x_5x_4 \xrightarrow{F_4} y_6y_5y_4$ как для случая рис. 2, *а*, так и для рис. 2, *б* появятся противоречия т. е. такие значения $x_i x_{i-1}x_{i-2}$ которым соответствуют разные значения $y_i y_{i-1}y_{i-2}$. Противоречие может быть снято если ввести дополнительную внутреннюю переменную r вычисляемую через комбинационную схему F_1.

При контроле сравниваются переменные $y_1y_2...y_m$ вычисленные прямым способом через F_1 с теми же переменными $y_1y_2...y_m$ вычисленными через F_4 и F_5, тогда можно зафиксировать наличие ошибки любой кратности как факт несовпадения кодов.

Для упрощения комбинационных схем F_1, F_5 и F_4 в качестве памяти автомата целесообразно использовать счетчик с кодом Грея. При работе со счетчиком код $a(t+1)= \tilde{\alpha}\, a(t)$. Тогда достаточно проверить факт различия a(t) и a(t+1) только в одном разряде.

На рис. 1 приведены две разметки (нумерации) в графе переходов. В первой разметке (нумерации рядом с вершинами графа) выделяются две непрерывных цепи от 0 до 13 и от 14 до 20, а во второй – одна непрерывная цепь от 0 до 20 (цифрами внутри обозначены вершины графа).

Для второй разметки перечень переходов вне счетчика для заданного примера представлена в табл. 1, а в табл. 2 и 3 выделенные соответствия $x_1x_2x_3 \to y_1y_2y_3$ и $x_3x_4x_5 \to y_3y_4y_5$. Как видно из табл. 2 и 3, имеется противоречие соответствия как в табл. 2 (для $x_3x_2x_1 \to 111,100$), так и в табл. 3 ($x_5x_4x_3 \to 000,011$).

Таблица 1

Таблица логических переходов автомата

	α(t)	a(t)	a(t+1)	α	N(t)	N(t+1)	α(t+1)
				x_6	$x_5x_4x_3x_2x_1$	$y_5y_4y_3y_2y_1$	
1	$\overline{\alpha_1}$	1	6	0	00001	00110	0
2	$\overline{\alpha_2}$	2	1	0	00010	00001	
3	$\overline{\alpha_3}$	7	6	0	00111	00110	0
4	$\overline{\alpha_4}$	12	20	0	01100	10100	0
5	$\overline{\alpha_5}$	15	13	0	01111	01101	0
6	$\overline{\alpha_6}$	19	1	0	10011	0001	
7	α_0	20	0	0	10100	00000	0

Введение переменной r, значение которой является общим как для табл. 2 и 3, позволяет разрешить это противоречие. Переменная α для табл. 2 и 3 не используется т. к. в примере для всех переходов (табл. 1) значение α равно нулю.

На рис. 3 представлены карты Карно для определения α(t+1) и факта неопределяемого значения $\overline{\alpha}$(t+1), т. к. оно должно соответствовать значению α(t) от мультиплексора.

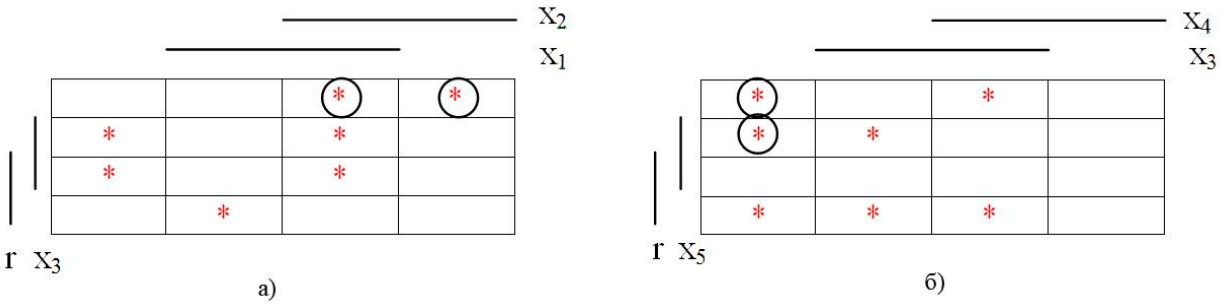


Рис. 3. Функции F_4 и F_5 в булевом пространстве {x}

Таблица 2

	r	$x_3x_2x_1$	$y_3y_2y_1$	α
1	1	001	110	0
2	0	010	001	~
3	1	111	110	0
4	1	100	100	0
5	0	111	101	0
6	0	011	001	~
7	0	100	000	0

Таблица 3

	r	$x_5x_4x_3$	$y_5y_4y_3$	α
1	1	000	001	0
2	0	000	000	~
3	1	001	001	0
4	1	011	101	0
5	0	011	011	0
6	0	100	010	~
7	0	101	000	0

По рис. 3, *а* получим $\bar{\alpha}$ (t+1)= $\bar{r}\bar{x}_3x_2$ $\alpha(t+1)=x_3(\bar{x}_2\bar{x}_1+x_2x_1)+\bar{r}\bar{x}_3\bar{x}_2x_1$, а рис. 3, *б* – $\bar{\alpha}$ (t+1)= $\bar{r}\bar{x}_4\bar{x}_3$ и α (t+1)= $\bar{r}\bar{x}_3(x_5\bar{x}_4+\bar{x}_5x_4)+r\bar{x}_5(\bar{x}_4+x_3)$. По табл. 2 и табл. 3 получим соответственно:

$$y_1=\bar{r}x_2(\bar{x}_3+x_1);\ y_2=rx_3x_2x_1;$$
$$y_3=\bar{r}x_2(\bar{x}_3x_1+x_3x_1)+x_3x_2x_1;\ y_4=\bar{r}\bar{x}_5x_4x_3;$$
$$y_5=r\bar{x}_5x_4x_3.$$

Ошибка фиксируется при двух обстоятельствах $ERR_1=(\alpha_2\oplus\alpha_3)+(\bar{\alpha}_2\oplus\bar{\alpha}_3)$ $ERR_2=y_1y_2y_3y_4y_5(F_1)\oplus y_1y_2y_3y_4y_5(2,3)$ где индексы 2, 3 соответствуют значениям переменных полученным по табл. 2, 3, например, α_2,α_3 α (t+1) из табл. 2 и α (t+1) из табл. 3.

$$\tilde{\alpha}=\bar{r}\bar{x}_3x_2,\ \tilde{\alpha}=\bar{r}\bar{x}_4\bar{x}_3$$
$$\alpha=x_3(\bar{x}_2\bar{x}_1+x_2x_1)+r\bar{x}_5\bar{x}_2x_1,$$
$$\alpha=r\bar{x}_5(\bar{x}_4+x_3)+\bar{r}\bar{x}_5\bar{x}_4x_3+\bar{r}\bar{x}_5x_4x_3=$$
$$\bar{r}\bar{x}_3(x_5\bar{x}_4+\bar{x}_5x_4)+r\bar{x}_5(\bar{x}_4+x_3).$$

Метод контроля классических автоматов с дублированием схем F_1 известен [17, 38]. Однако он требует применения двух схем F_{11} и F_{12} с полным числом переменных {α} {x} т. е. с объёмом V=m2^{m+q} каждая. В предлагаемом методе объём F_1 составит W=m2^{m+1}, а суммарный объём F_5, F_4, будет меньше W. Более того, через схемы F_5, F_4 можно вычислить значение α(t) и сравнить его с фактически выбранным через мультиплексор. Значение α(t) должно быть равным «0», если следующий переход a(t)→a(t+1) безусловен, значение будет неопределённым, если выбирается очередное $\alpha_j\in\{\alpha\}$. Такой способ контроля с проверкой не только a(t+1), но и α(t) может быть осуществлён только в предлагаемой структуре самоконтролируемого автомата.

Заключение

Предложен новый способ контроля правильности формирования кодов состояний автомата управления, основанный на использовании структуры автомата с мультиплексором и введении упрощённой дублирующей комбинационной схемы вычисления следующего состояния автомата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петровский А. М. Коды с обнаружением и исправлением ошибок. – М. : Изд-во иностр. лит., 1956. – 72 с.
2. Закревский А. Д. Метод синтеза функционально-устойчивых автоматов // ДАН СССР. – 1959. – Т 129. – вып. 4. – С. 729–731.
3. Сагунов В. Г. Алгоритм технического диагностирования дискретных устройств. – М. : Радио и связь, 1990. – 111 с.
4. Тоценко В. Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. – М. : Радио и связь, 1985. – 238 с.
5. Щербаков Н. С. Подкопаев Б. П. Структурная теория контроля автоматов. – М. : Машиностроение, 1982. – 191 с.

6. Мухопад Ю. Ф. Микроэлектронные системы управления. – Братск : БрГУ, 2009. – 285 с.
7. Гаврилов М. А. Структурная избыточность и надёжность работы релейных устройств : тр. I Междунар. конгр. федерации по автоматич. управл. – М. : Ан СССР, 1961. – Т. 3.
8. Гаврилов М. А., Девятков В. В., Пупырёв Е. И. Логическое проектирование дискретных автоматов. – М. : Наука, 1977. – 352 с.
9. Кузьмин И. В., Бурназян Р. Г., Ковергин А. А. Аппаратный контроль ЦВМ. – М. : Энергия, 1974. – 73 с.
10. Сагомонян Е. С., Слабаков Е. В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М. : Радио и связь, 1989. – 208 с.
11. Валиев Ш. К. Способ построения асинхронных конечных автоматов // Совершенствование и повышение надёжности ж. д. систем автоматики, телемеханики и связи. – Днепропетровск : ДИИЖТ, 1985. – С. 88–95.
12. Закревский А. Д. Логический синтез каскадных схем. М. : Наука, 1981. – С. 259–278.
13. Барашенков В. В., Кокаев О. Г., Гужавин А. А. Контроль синтаксической корректности операторных схем алгоритмов // Вычислительная техника. – Л. : ЛГУ, 1975. – С. 64–71
14. Балакин В Н., Барашенков В. В, Казак А. Ф., Никищенков С. А. Устройство для контроля блоков управления // А. с. № 1451637 СССР. 1989. БИ № 12. – ; См. также : Л. : Изв. ЛЭТИ. – Вып. 394. – 1988: – С. 20–24.
15. Балакин В. Н. Проектирование систем диагностики специализированных ЦВМ / Смолов В. Б. // Специализированные ЦВМ. – М. : Высшая школа, 1981. – С. 230–235
16. Дончева Н. Б., Визирев И. С. Надёжность функционирования автоматов, реализованных в однородных средах // Синтез управляющих устройств в однородных средах – М. : Наука, 1984. – С. 87–118.
17. Буинов А. Н. Построение управляющих автоматов с безошибочным поведением / Проектирование специализированных вычислительных управляющих устройств. – Иркутск : ИГУ, 1984. – С. 3–9.
18. Мухопад Ю. Ф., Сербуленко Л. М. Автоматическая интерпретация устройств контроля МПС // Микропроцессорные системы контроля и управления : тр. Сибирск. научн.-практ. конф. – Новосибирск. : НЭТИ ; Томск : ТИАСУР. – 1992. – С. 41–49.
19. Никищенков С. А. Функциональная диагностика реконфигурируемых транспортных технологических систем по информационно-логическим схемам процессов. – Самара : СНЦРАН, СамГАПС, 2005. – 159 с.
20. Массель Л. В., Новик К. В. Столяров Л. Н. Joiner-сеть для событийного моделирования // Информационные и математические технологии : тр. X Байкальский Всерос. конференции. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2004. – 317 с.
21. Методы построения безопасных микроэлектронных систем ж.д. автоматики / ред. Вл. В. Сапожников. – М. : Транспорт. 1995. – 273 с.
22. Смолов В. Б. Чекмарёв Ю. Д. Мухопад Ю. Ф. Использования системы геометрических кодов в ПЗУ : изв. ВУЗов. Сер. Приборостроения. – 1971. – Т. 14, № 6 – С. 73–79
23. Tohma Y., OhyamaY., Sakai R. Realization of Fail-Safe-Secquential Machines by Using a K-out-of N Code // IEEE Trausact on Comput. – 1971. – № 11 – 20 с.
24. Anderson D., Metze G. Desing of Totally Selfcheking Chech Circuits for m-out-of-n Codes // IEEE Trans Comput. – 1973. – C. 22.
25. Geffroy J. C. Totally Self-testing Asynchrous Secquential Cicuits. Jn : Proc. Symp. TFAC «Discrete systems». Riga, 1974.
26. Сапожников В. В., Свпожников В. В. Методы синтеза надёжных автоматов. – Л. : Энергия, 1980. – 93 с.
27. Сапожников В. В.. Кравцов Ю. А.. Сапожников Вл. В. Теория дискретных устройств ж. д. автоматики, телемеханики и связи. – М. : Транспорт, 2001. – 320 с.
28. Мухопад Ю. Ф.. Чекмарёв Ю. Д. ПЗУ с самоконтролем // А. с. № 1410101 СССР. 1988, БИ № 26
29. Мухопад Ю. Ф. Мухопад А. Ю. Бадмаева Т. С. Самоконтролируемый автомат // Патент России № 63588. 2007. БИ №15
30. Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ф., Бадмаева Т. С. Встроенный контроль в автоматах управления Иркутск // Вестн. ИрГТУ, 2006 – № 2. – С. 148–150.
31. Мухопад А. Ю., Мухопад Ю. Ф. Метод синтерза сложных автоматов. – Новосибирск : Изв. НГТУ, 2008. – № 3. – С. 55–58.
32. Мухопад А. Ф., Мухопад Ю. Ф. Микропрограммный автомат Патент России №82888 БИ № 13. 2009.
33. Мухопад А. Ю. Структурный синтез автоматов управления системами обработки информации реального времени : автореф. дис. канд. – Братск, 2010. – 19 с.
34. Mukhopad Yr. F., Mukhopad A. Yr. Microelectronic Controlling of Realtime Complicated Technical Systems // International Journal of Applied and Fundamental Research (JSSN 1996-3955). – 2009. – № 2. – P. 26–29.
35. Мухопад Ю. Ф. Теория дискретных устройств. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – 172 с.
36. Мухопад А. Ю. Метод динамического контроля автоматов управления // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск : ИрГУПС, 2010. – вып. 17. – С. 139–142.
37. Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ю. Метод синтеза сложных автоматов // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XI Байкальской Всерос. конф. – Иркутск, 2009. – Т. 1. – С. 157–163.
38. Соловьев В. В., Климович А. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС. – М. : Горячая Линия-Телеком, 2008. – 375 с.
39. Шишкин Г. И. Обеспечение помехоустойчивости цифровых систем. – Саров : ФГУП РФЯЦ-ВНИИ ЭФ, 2004. – ч. 1. – 435 с.
40. Франсис Т. А., Янбых Г. Ф. Избыточность в электронных дискретных устройствах. – Л. : Энергия, 1969.

УДК 621.81

Ревенский Алексей Алексеевич,
аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел.: (8395-2) 638-357, E-mail: foka5@yandex.ru
Гозбенко Валерий Ерофеевич,
д-р техн. наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения
тел.: (8395-2) 638-357, E-mail: vgozbenko@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРЦЕВОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ

A.A. Revenskiy, V.E. Gozbenko

MODELING OF END COGWHEEL CESSION

Аннотация. *В статье рассмотрена модель зубчатого взаимодействия торцевого зацепления.*

Ключевые слова: *торцевое зацепление, моделирование, контакт.*

Abstract. *In this article we considered the model of cogwheel mutual interaction for end detent contact.*

Keywords: *face gearing, modeling, contact, end cogwheel cession.*

Введение

Наиболее распространенным видом редуцирующих элементов являются механические зубчатые передачи. Технические задачи диктуют новые требования к зубчатым зацеплениям: компактность и малый вес и вместе с тем большие удельные мощности, долговечность. В этой связи создаются новые виды зацеплений и передачи на их основе.

Для проектирования, исследования зубчатых зацеплений в промышленности и научных разработках применяются различные математические, трехмерные, прочностные модели, позволяющие в широком диапазоне рассмотреть и обозначить важные характеристики изготавливаемой или подготавливаемой к изготовлению зубчатой передачи на базе какого-либо зацепления [1, 2, 3, 4 и др.].

Известна механическая передача с торцовыми зубьями [5], где число зубьев шестерни равно четырем, что позволяет реализовать большие передаточные отношения. При одинаковых габаритах (в сравнении с эвольвентной передачей) размер зубьев может быть увеличен в 2–2,5 раза, что снижает изгибные напряжения. Использование выпуклой и плоской рабочих поверхностей в качестве сопряженных позволяет снизить контактные напряжения. Эксплуатация опытных и опытно-промышленных образцов приводов на базе передачи Нечаева подтвердила перечисленные достоинства [6]. Следует отметить, что промышленное освоение этой передачи сдерживается технологическими трудностями, возникающими при производстве.

В статье рассматривается торцевая зубчатая передача [7], позволяющая устранить некоторые недостатки передачи Нечаева.

Для подтверждения характеристик предлагаемого зацепления и передачи на его основе проведены модельные, геометрические и прочностные виды моделирования.

Рассмотрим моделирование торцевой зубчатой передачи, позволяющее с помощью математического аппарата и трехмерного моделирования зацепления торцевых зубчатых колес выяснить, каковым (точечным или линейным) является контакт профилей зубьев.

Как известно из технического решения [7], зуб шестерни представляет собой тело вращения (цилиндр, усеченный конус и т. д.), в то время как ответная поверхность – грань зуба колеса – является плоскостью. На рис. 1 показана конструктивная схема торцевой зубчатой передачи, где 1 и 2 – зубья шестерни и колеса соответственно. Силовое взаимодействие зубьев шестерни и колеса происходит по поверхностям 3 и 4.

Для выяснения характера контакта взаимодействующих зубьев построим зуб шестерни в виде поверхности второго порядка – конуса, а зуб колеса в виде одной из граней (плоскости зуба), по которой идет взаимодействие. Построение произведем таким образом, что вершина конуса и точка A плоскости зуба колеса будут совпадать с началом координат (рис. 2), что позволит упростить написание уравнения конуса и плоскости, заданной тремя точками.

Введем обозначения:

a – тангенс угла наклона грани зуба колеса (β) к вертикальной оси зуба;

b – тангенс угла наклона плоскости зубьев колеса к оси OZ (α);

c – тангенс угла конусности зубьев шестерни (γ);

H – высота зуба колеса в торцевой (вертикальной) плоскости;

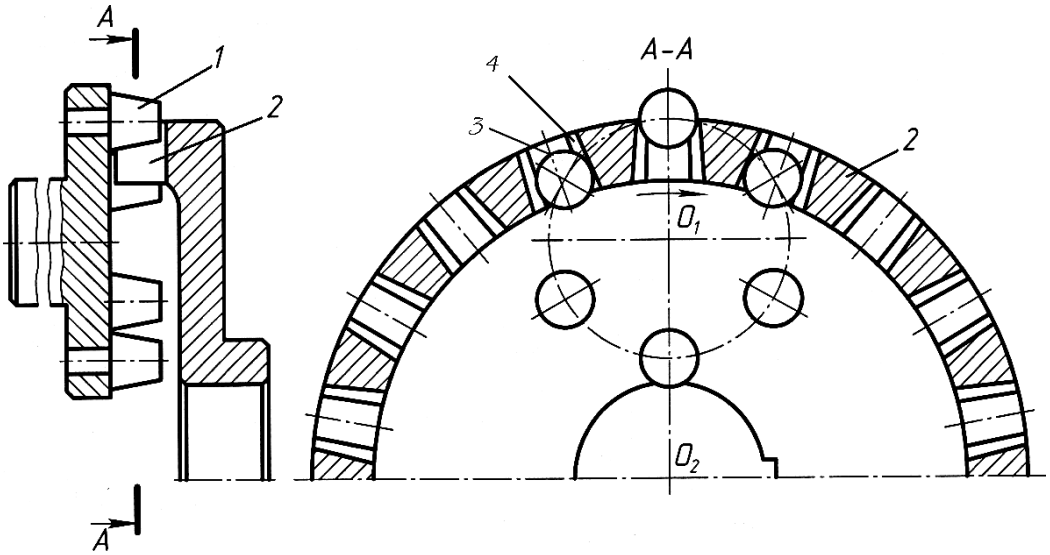


Рис. 1. Конструктивная схема торцевой зубчатой передачи

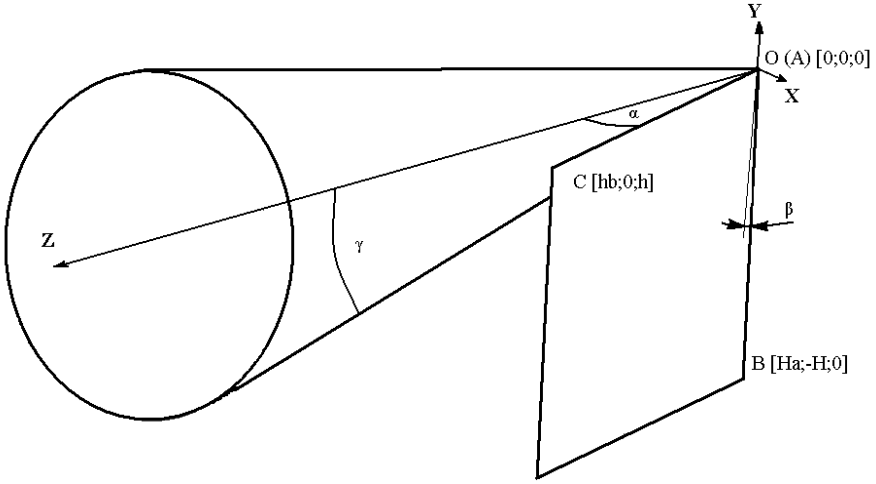


Рис. 2. Относительное расположение конуса и плоскости

h – высота зуба колеса в горизонтальной плоскости.

Координаты точек плоскости соответственно запишутся следующим образом: A (0; 0; 0), B ($H \cdot a$; $-H$; 0), C ($h \cdot b$; 0; h). Зная координаты трех точек плоскости, запишем уравнение плоскости:

$$x + a \cdot y - b \cdot z = 0.$$

Путем вращения прямой $z = \frac{x}{c}$ вокруг оси OZ, заменив в уравнении прямой x на $\sqrt{x^2 + y^2}$, получим уравнение конуса:

$$x^2 + y^2 - c^2 \cdot z^2 = 0.$$

Составленные уравнения объединим в систему:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - c^2 \cdot z^2 = 0; \\ x + a \cdot y - b \cdot z = 0. \end{cases}$$

По построению линия пересечения (касания) плоскости и конуса должна находиться в координатной плоскости XOZ, соответственно для выполнения этого условия к полученным двум уравнениям добавим третье, тогда система примет вид

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - c^2 \cdot z^2 = 0; \\ x + a \cdot y - b \cdot z = 0; \\ y = 0. \end{cases}$$

Однако при решении системы приходим к результату

$$\begin{cases} x = c \cdot z; \\ x = b \cdot z; \\ y = 0. \end{cases}$$

Полученные уравнения указывают на то, что при разных коэффициентах при z решение данной системы невозможно, а значит, необходимо еще одно условие для касания профилей по линии, которое обеспечивает равенство угла наклона контактной плоскости зуба колеса к оси OZ и угла конусности зуба шестерни. Следовательно, найдем:

$$\begin{cases} x = c \cdot z; \\ x = b \cdot z; \\ b = c; \\ y = 0. \end{cases}$$

Данная система представляет собой геометрический образ прямой, а значит, профили зуба шестерни и зуба колеса касаются по полученной линии (прямой), описываемой системой уравнений.

Для иллюстрации полученного результата и возможных вариантов касания двух профилей взаимодействие зубчатых колес было перенесено в пакет трехмерного твердотельного моделирования КОМПАС-3D (рис. 3).

На рис. 3, *а, б* показано пересечение поверхностей зуба шестерни и колеса (при отклонении α более чем на 10 %), их взаимопроникновение, однако на практике это означает, что силовой контакт происходит в некоторой точке (по малой площадке). Причем на рис. 3, *а* точка контакта будет находиться у вершины зуба колеса (основания зуба шестерни), на рис. 3, *б* – наоборот. Рис. 3, *в* иллюстрирует случай, когда касание происходит по прямой, что является наиболее выгодным с точки зрения прочности и износостойкости.

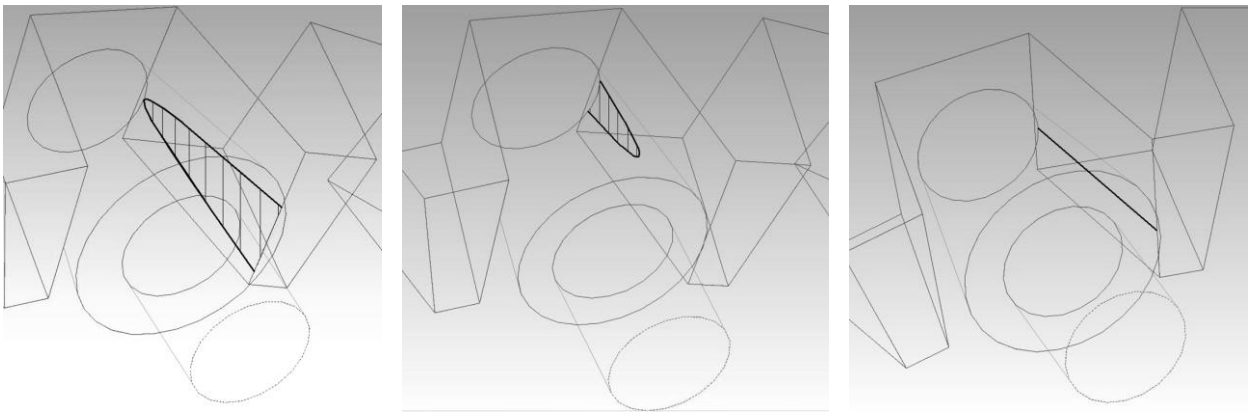
В пакете КОМПАС-3D был выполнен еще ряд построений по взаимодействию зубьев для изучения влияния отклонения угла конусности α, которые показали, что при отклонении угла на ± 3% касание происходит по некоторой площадке, которая располагается вдоль прямой показанной на рис. 3, *в*, что вполне может произойти при ошибке в изготовлении.

Прочностное моделирование зубчатого зацепления торцевой зубчатой передачи проводилось в пакетах конечноэлементного анализа: Femap на базе Nastran и APM WinMachine. Необходимость численного моделирования обусловлена тем, что зуб по линии контакта имеет переменный радиус, что не позволяет напрямую использовать формулы Герца.

Ставилась задача рассмотреть общую картину полей напряжений при взаимодействии зубчатых колес и в зоне контакта «зуб шестерни – зуб колеса».

Общая картина зацепления моделировалась в программном комплексе APM WinMachine.

На рис. 4 показано моделирование напряженного состояния контактных элементов зацепления (*а*), а также в ободе шестерни (*б*) и колеса (*в*). Определение напряжений в зоне контакта необходимо для оценки пятна контакта и обоснова-



а) б) в)

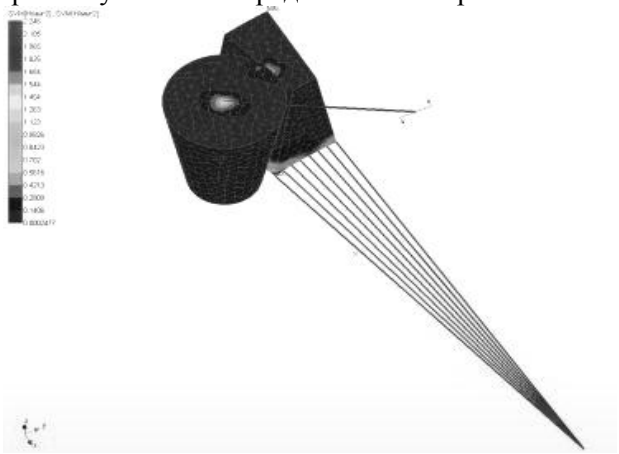
**Рис. 3. Результаты моделирования в пакете КОМПАС-3D:
а) угол конусности больше α; б) угол конусности меньше α;
в) угол конусности равен α**

а) б) в)

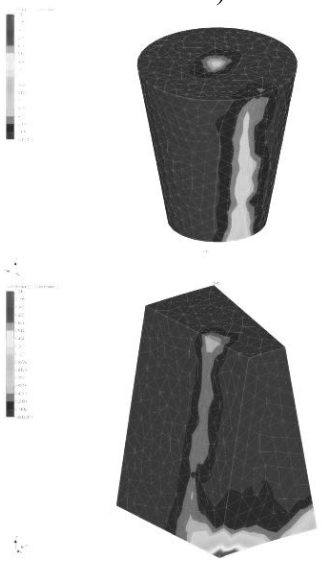
**Рис. 4. Карта распределения напряжений:
а) напряжения в зоне контакта зубьев; б) напряжения на шестерне;
в) напряжения на колесе**

ния выбора материала зубьев. Распределение напряжений на ободе колеса и шестерни позволит научно обосновать выбор толщины обода. Однако модель может быть дополнена соединением «колесо – вал» для отображения полной картины распределения напряжений в зоне закрепления колеса и шестерни, которое в данной модели выполнено в виде опор по плоскости крепления вала, причем колесо закреплено полностью, а шестерня имеет возможность поворота и перемещения. Нагрузка прикладывается к шестерне в виде момента, заданного распределенной нагрузкой на ободе (100 Н/мм).

Моделирование взаимодействия «зуб шестерни – зуб колеса» представлены на рис. 5.



а)



б)

Рис. 5. Распределение напряжений в зоне контакта зубьев: а) напряжения (общий вид); б) напряжения на зубьях шестерни и колеса

Моделирование проводилось на зубьях шестерни и колеса, находящихся в силовом контакте так, если бы эти зубья были размещены на теле шестерни и колеса соответственно и находились в положении, когда происходит контакт. Перемещение (поворот) зуба шестерни производится с помощью невесомого жесткого элемента, закрепленного одним концом на оси зуба шестерни, другим – на оси вращения шестерни, где и задается момент. Моделирование слоев, на которых должны крепиться зубья, производятся с помощью установления опор, запрещающихся перемещение в осевом направлении. Моделирование тела колеса и, соответственно, стопорение зуба также производится жесткими элементами. В результате моделирования можно заметить и подробно рассмотреть пятно контакта двух профилей. По картине распределения напряжений, в частности, можно наблюдать, что напряжения распределяются вдоль поверхности зуба колеса и шестерни по некоторой прямой. Данный факт может свидетельствовать о том, что контакт имеет линейный характер, а не точечный, что в свою очередь указывает на большую контактную прочность, нежели при точечном взаимодействии (или по малой площадке вокруг точки). Однако неравномерность конечноэлементной сетки в зоне контакта приводит к некоторой некорректности результата: имеются области повышенных (пониженных) напряжений, выбивающиеся из общей картины.

Для представления картины контакта в некотором сечении зубьев проводилось моделирование в программном комплексе Femap на базе Nastran [8].

Моделировалось взаимодействие двух произвольных сечений зубьев, которые представлялись в виде пластин. Для моделирования других слоев, пластины закреплялись по всей плоскости с запрещением перемещения вдоль оси зуба (ось Z, рис. 6). Нагрузка прикладывалась в виде момента в узле (центр шестерни), соединенном с центром пластины – сечением зуба шестерни – жесткими элементами. Закрепление сечения колеса также проводилось жесткими элементами.

Моделирование зацепления в виде пластин показало схожесть распределения напряжений в зоне контакта, как и при моделировании двух твердотельных элементов – отдельных зубьев. Пятно контакта имеет схожую ширину и напряжения близки по значениям в обоих случаях моделирования.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о линейном контакте зубьев торцевой зубчатой передачи, что в свою очередь говорит о высокой контактной прочности по сравнению с точечным взаимодействием. Дальнейшие работы по моделированию взаимодействия зубчатых колес, зубьев в отдельности позволят получить предваритель-

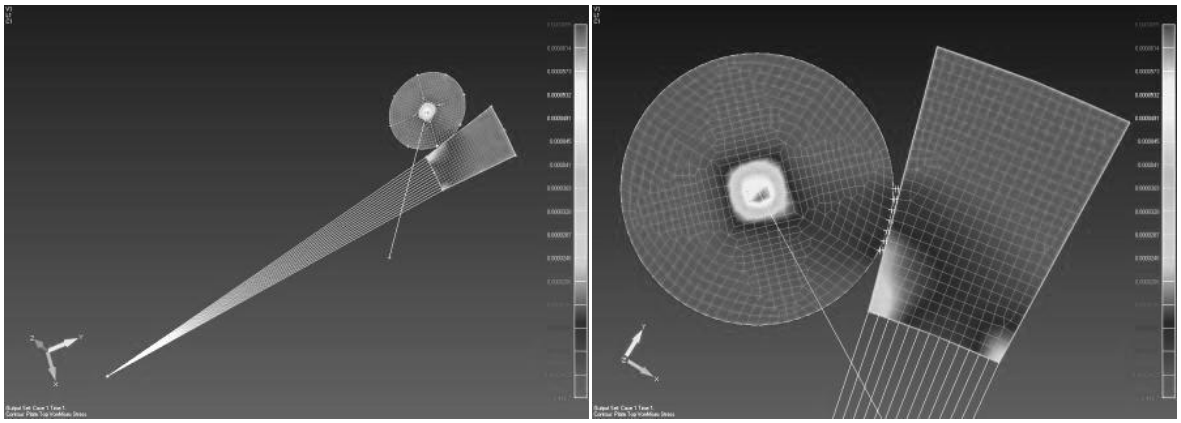


Рис. 6. Напряжения в зацеплении зубьев в виде пластин

ную картину работы зацепления и сравнить взаимодействияе с макетными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Литвин Ф., Фуентес А., Хайасака К. Проектирование, производство, анализ напряженного состояния и экспериментальные исследования малошумных высокопрочных спиральнозубых конических передач // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-тех. конф. – Ижевск, 2008. – С. 33–63.
2. Литвин Ф., Гонзалез-Перез И., Юкишима К. Проектирование и моделирование зацепления и контактные напряжения для усовершенствования червячной передачи // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-тех. конф. – Ижевск, 2008. – С. 64–81.
3. Солнышкин Н. П., Евгеньева Е. А., Самаркин А. И. Моделирование отделочной обработки зубьев методом конечных элементов // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения: сб. докл. науч.-тех. конф. – Ижевск, 2008. – С. 321–324.
4. Казакявичюс С. М., Становской В. В., Ремнёва Т. А. Расчет циклоидально-эксцентрикового зацепления и механизмов на его основе // Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения : сб. докл. науч.-тех. конф. – Ижевск, 2008. – С. 153–156.
5. Нечаев А. И. Зубчатая передача с торцовыми зубьями // Патент России № 2374529. – 2008, Бюл. № 7, Бюл. № 10.
6. Нечаев А. И., Синенко Е. Г., Сильченко П. Н. Торцовые зубчатые передачи и механизмы, построенные на их базе // Наука производству. – 2000. – № 3(28). – С. 47–50.
7. Тупицын А. А., Каргапольцев С. К., Милованов А. И., Тупицын А. А., Ревенский А. А. Торцевая зубчатая передача с внутренним зацеплением // Патент России № 2354870. 2009. Бюл. № 13.
8. Пыхалов А. А., Кудрявцев А. А. Математические модели в инженерных приложениях : учеб. пособие. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2008. – 184 с.

УДК 621.3.019

Володарский Владислав Афанасьевич,
канд. техн. наук, доцент, кафедра транспортных систем,
Красноярский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС
тел.: 8 (391) 221-60-72, e-mail: wolaw@krw.ru

ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ЗАМЕН И РЕМОНТОВ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

V.A. Volodarsky

THE PRINCIPLE OF PREVENTIVE REPLACEMENT AND REPAIR OPTIMIZATION SUBJECT TO INDETERMINATION

Аннотация. *Изложен методический подход к постановке и решению задач оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств в условиях неопределенности исходной информации.*

Ключевые слова: *оптимизация, ремонт, замена, периодичность, информация, неопределенность.*

Abstract. *The methodic approach to the task setting and task solution of preventive replacement optimization and technical facilities repair in condition of initial information indetermination is described.*

Keywords: *optimization, repair, replacement, intensity, information, indetermination.*

1. Исходные положения

В настоящее время оптимизационные расчеты параметров предупредительных замен (ПЗ) и предупредительных ремонтов (ПР) технических устройств (ТУ) проводятся, как правило, в предположении о строгой достоверности и однозначности используемой исходной информации и, следовательно, о строгой однозначности получаемых решений. Недостатком такого подхода является заведомое преувеличение точности оптимизации и невозможность выявить решения, экономически близкие к однозначно определяемому формально-оптимальному решению.

При решении практических задач оптимизации ПЗ и ПР неизбежна большая или меньшая неопределенность исходной информации. Она проявляется в недостоверном знании численных значений исходных показателей или их вероятностного описания. Поэтому становится очевидным, что методы оптимизационных расчетов при полностью определенной информации все в большей мере приходят в противоречие с реальной действительностью. Объективно существующая неопределенность исходной информации требует принципиально нового подхода к постановке и решению задачи. Оптимизация в условиях неопределенности неизбежно содержит эвристические процедуры, исключающие полную формализацию этого процесса. При этом речь идет не о технических, а именно о принципиальных трудностях формализации, вызванных неполным знанием.

Учет факторов неопределенности при принятии решений о параметрах ПЗ и ПР имеет ряд преимуществ. Во-первых, наибольшее приближение формализованных методов решения к реальным условиям эксплуатации. Во-вторых, обязательность многовариантных расчетов и возможность анализа на их основе последствий от принятия решений. В-третьих, возможность выбора наиболее гибких решений из числа практически равно экономичных. В-четвертых, возможность принятия более обоснованных решений и уменьшение риска перерасхода средств, обусловленного неточным знанием.

2. Постановка задачи

Особого внимания в условиях неопределенности требует сама постановка задачи, которая заключается: 1) в описании технико-экономической сущности задачи, целей и критериев оптимизации; 2) в математической формализации задачи, включающей определение целевой функции, ограничений и состава параметров, неопределенность которых может повлиять на результаты решения.

Оптимизация заключается в установлении таких значений параметров ПЗ и ПР, при которых обеспечивается максимально возможный в определенных условиях эффект. Под эффектом здесь понимается полное или частичное достижение определенных целей. Выделим наиболее существенные цели и соответствующие им критерии. Очевидно, что система ПЗ и ПР не может считаться совершенной, если она недостаточно экономически эффективна. Поэтому основным критерием

оптимизации является минимум удельных эксплуатационных затрат на ПЗ и ПР и аварийное восстановление с учетом ущерба от возможных отказов ТУ. В отдельных случаях отказы могут приводить к нарушениям безопасности ТУ, например безопасности движения транспортных систем. Поэтому вторым критерием при определении параметров ПЗ и ПР следует считать обеспечение безопасности при эксплуатации ТУ.

При оптимизации ПЗ и ПР невозможно рассматривать экономическую эффективность и безопасность в отрыве от надежности. Следует подчеркнуть, что применительно к ТУ надежность приобретает как бы двойную значимость. Она, с одной стороны, существенно влияет на экономическую эффективность, а с другой – в значительной мере предопределяет безопасность. В рамках комплексного подхода рационально считать, что основными являются критерии экономической эффективности и безопасности, а надежность – средство, с помощью которого достигаются требуемые значения этих показателей. Тогда задачу оптимизации можно сформулировать следующим образом: найти такие значения параметров ПЗ и ПР, при которых достигается минимум удельных эксплуатационных затрат и обеспечивается допустимый по условиям безопасности уровень надежности ТУ.

С точки зрения математической формализации и общих подходов к ее решению задача оптимизации ПЗ и ПР относится к классу задач исследования операций [1]. Она сводится к нахождению таких значений управляемых параметров U, при которых в условиях воздействия неуправляемых Z и фиксированных W параметров целевая функция $C(U,Z,W)$, определяющая удельные эксплуатационные затраты, принимает минимальное значение. В качестве управляемых параметров U выступает периодичность τ и глубина α ПЗ и ПР устройств. Фиксированными параметрами W являются стоимость ПЗ и ПР B и стоимость аварийного восстановления с учетом ущерба от отказов ТУ A. В качестве неуправляемых параметров Z выступают вероятность безотказной работы (ВБР) P и вероятность q того, что отказ ТУ будет устранен минимально необходимым аварийным ремонтом.

На параметры целевой функции могут быть наложены ограничения в виде равенств и неравенств. ВБР, определяющая состояние ТУ, зависит от параметров τ и α и описывается функцией распределения F. По условиям обеспечения безопасности ВБР должна быть не ниже определенного допустимого значения P_∂. Поскольку ПЗ и ПР направлены на предупреждение отказов ТУ, периодичность их должна быть меньше наработки на отказ T. Тогда в общем виде задача оптимизации ПЗ и ПР устройств может быть формализована следующим образом:

$$C(\tau,\alpha) = \min C(\tau,\alpha;A,B;P,q)$$

при

$$P = F(\tau,\alpha),\ \alpha \geq 0,\ 0 < \tau < T,\ P \geq P_\partial. \qquad (1)$$

Введем понятия C-критерия, по которому определяются оптимальные параметры ПЗ и ПР из условия минимума удельных эксплуатационных затрат, и P-критерия, по которому определяются параметры ПЗ и ПР из условия обеспечения допустимой по безопасности ВБР. На практике при проведении ПЗ и ПР существует ряд ограничений материальных ресурсов, численности персонала, длительности проведения, погодных условий и т.п. Сроки ПЗ и ПР различных ТУ должны быть увязаны между собой. В рамках C- и P-критериев трудно, а иногда и невозможно учесть влияние множества ограничений и факторов, ряд из которых может быть задан лишь в качественной форме и не влияет на поиск оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Поэтому представляется целесообразным такие ограничения не формализовывать, а учитывать их при принятии окончательных решений.

Если для параметров целевой функции Z, W и функции распределения F имеются однозначные статистические характеристики, то решаемая оптимизационная задача (1) будет вероятностно-определенной. Если для Z и W имеются только данные об их возможных диапазонах, а F может быть задана серией возможных функций распределения, то задачу (1) необходимо решать в вероятностно-неопределенной постановке. Таким образом, математические принципы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности исходной информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Поэтому применению формализованных методов оптимизации должен предшествовать анализ исходной информации, неопределенность которой влияет на результаты решения задачи.

3. Анализ факторов неопределенности

Задачей анализа является классификация и качественное описание факторов неопределенности для того, чтобы выяснить возникающие при оптимизации методические и практические трудности решения и наметить пути их преодоления, а также установить в дальнейшем степень влияния этих факторов на точность оптимизации ПЗ и ПР устройств. Точность оптимизации можно оценить по отклонениям целевой функции от оптимально-

го значения под действием интересующего нас параметра в виде коэффициента $K = C / C_o$, где C – значение целевой функции при отклонении параметра; C_o – значение целевой функции при оптимальном значении параметра.

Используя классификацию [2], исходную информацию в задачах оптимизации ПЗ и ПР можно разделить на четыре вида: 1) детерминированную; 2) вероятностно-определенную, когда известны функции и параметры распределения случайных величин; 3) вероятностно-неопределенную, когда функции распределения случайных величин неизвестны и 4) собственно неопределенную.

С «полностью» неопределенной информацией на практике оперировать, как правило, не приходится, так как по любому параметру можно тем или иным способом, включая экспертные оценки специалистов, получить необходимый минимум ориентировочной информации. К детерминированной относится информация о стоимости ПЗ и ПР B, среднее значение которой однозначно определено нормативными документами. Информацию о стоимости аварийного восстановления, входящей в состав параметра A, можно отнести к условно-детерминированной, поскольку она не может быть определена однозначно из-за некоторой её зависимости от ряда случайных факторов, таких как, внезапность отказов ТУ, квалификация обслуживающего персонала и т. п. Информацию об ущербе от отказов ТУ в силу случайного, а иногда недостаточно определенного характера, можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

На практике большие трудности возникают с точной оценкой глубины ремонта α и её вклада в изменение показателей надежности ТУ, поскольку качество ПР зависит от ряда случайных, трудно учитываемых факторов, таких как состояние ТУ, качество запасных частей и процедур ремонта, квалификация ремонтного персонала и др. В зависимости от наличия статистического материала информацию о параметре α можно отнести к вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Особые трудности на практике возникают при выборе функции распределения F из-за малого объема статистического материала об отказах ТУ. Определить функцию распределения существующими методами математической статистики [3] можно при количестве отказов более пятидесяти. В этом случае информация о F будет вероятностно-определенной, а в противном случае – вероятностно-неопределенной, так как при этом можно получить несколько возможных функций распределения. Информация о параметре q в зависимости от объема статистического материала об отказах ТУ может быть вероятностно-определенной или вероятностно-неопределенной.

Неопределенность исходной информации приводит к методическим и практическим трудностям решения задачи оптимизации ПЗ и ПР. При этом значительно повышается размерность решаемой задачи, так как появляется большое число возможных сочетаний информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Например, если задано три вида функции F и каждый из параметров A, α, q задан тремя значениями, то в этом случае имеет место 81 сочетание используемой информации, каждому из которых при решении задачи соответствует свое оптимальное значение параметров ПЗ и ПР.

Таким образом, неопределенность исходной информации приводит к неоднозначности решения оптимизационной задачи. Расчетным путем можно определить только зону, внутри которой каждая периодичность ПЗ и ПР при тех или иных сочетаниях исходной информации будет оптимальной. Такая зона названа академиком Л.А. Мелентьевым «зоной неопределенности оптимальных решений» [2]. Практическое следствие неопределенности исходной информации состоит в том, что неоднозначность результатов решения оптимизационной задачи приводит к неопределенности при выборе параметров ПЗ и ПР. Очевидно, что в этих условиях окончательное решение должно приниматься людьми на эвристической основе и такой «субъективный» выбор при неопределенности исходной информации неизбежен.

Трудности и отрицательные последствия, связанные с неопределенностью исходной информации, можно преодолевать по двум направлениям: 1) уменьшением неопределенности самой информации; 2) разработкой соответствующих методов оптимизации и принятия решений в условиях неопределенности. Работы по первому направлению чрезвычайно трудоемки и дороги. Кроме того, никакие усилия в этом направлении не позволят полностью ликвидировать неопределенность исходной информации. Поэтому весьма актуально проведение исследований по второму направлению с целью создания методов, позволяющих при неопределенности исходной информации принимать обоснованные решения по практически оптимальным параметрам ПЗ и ПР технических устройств.

4. Методические принципы решения задачи

Методы решения задачи оптимизации ПЗ и ПР в существенной мере зависят от степени определенности используемой исходной информации. Дадим классификацию задач оптимизации в зависимости от степени определенности информации о функции распределения вероятности безотказной работы и параметрах целевой функции. Рассмотрим три степени определенности информации о функции распределения: 1) F и ее параметры известны; 2) известен только коэффициент вариации V; 3) известна только наработка на отказ T. Первая степень соответствует вероятностно-определенной, вторая и третья – вероятностно-неопределенной информации. Рассмотрим три степени определенности информации о параметрах A, α, q: 1) детерминированная; 2) вероятностно-определенная; 3) вероятностно-неопределенная.

Типы возможных оптимизационных задач представим в виде двойного индекса, где первый индекс соответствует степени определенности информации о функции распределения, а второй – о параметрах целевой функции. Все задачи кроме 11, 12 являются вероятностно-неопределенными. В настоящее время в теории надежности разработаны только методы решения задач 11 [4, 5] и 31 [6]. Поскольку на практике при оптимизации ПЗ и ПР необходимая исходная информация является, как правило, вероятностно – определенной или вероятностно – неопределенной, наибольший интерес представляет разработка методов решения задач типов 12, 13, 22, 23, 32 и 33.

Один из возможных методических подходов к решению перечисленных задач заключается в следующем. Решение вероятностно-неопределенных задач сводится к их вероятностно-определенному эквиваленту. Для этого значения параметров целевой функции A, α, q в случае условно-детерминированной и вероятностно-определенной информации задаются математическим ожиданием, а в случае вероятностно – неопределенной информации – диапазоном значений. В последнем случае при отсутствии необходимых исходных данных параметры целевой функции оцениваются экспертным путем. Неизвестные функции распределения F выбираются эвристически. Причем для большей надежности получаемых решений необходимо задать несколько возможных функций распределения.

Для решения полученной эквивалентной вероятностно-определенной задачи можно применять известные методы, позволяющие находить оптимальные решения, соответствующие математическому ожиданию целевой функции вида

$$C(\tau/\alpha) = \min M[C(\tau; A, B, \alpha; P, q)],$$

где M – знак математического ожидания.

В результате решения такой задачи необходимо определять не только формально-оптимальные параметры ПЗ и ПР для каждой предварительно принятой функции распределения F, но зону всех возможных условно-оптимальных значений, исходя из диапазона изменения параметров целевой функции A, α, q или заданного коэффициента точности оптимизации K. В условиях неопределенности исходной информации формализованные методы решения поставленной задачи являются необходимым, но лишь вспомогательным инструментом, позволяющим при использовании вычислительной техники автоматизировать чрезвычайно трудоемкий, но необходимый процесс поиска условно-оптимальных значений параметров ПЗ и ПР. Окончательный выбор решений проводится специалистами с учетом опыта эксплуатации и с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

Решение задачи оптимизации ПЗ и ПР с использованием предложенного методического подхода состоит из следующих основных этапов.

1. Проводится сбор исходных данных об отказах, стоимости ПЗ и ПР и аварийного восстановления, а также об ущербе от отказов ТУ, на основании которых определяется необходимая для решения задачи исходная информация о функции распределения F и параметрах целевой функции A, B, α, q.

2. В зависимости от степени определенности исходной информации выбирается тип решаемой оптимизационной задачи.

3. Для вероятностно-неопределенных задач выбирается множество функции распределения F и задается коэффициент точности оптимизации K.

4. По C-критерию:

- в случае вероятностно-определенных задач вычисляется оптимальная периодичность ПЗ и ПР и соответствующий ей минимум целевой функции;
- в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения F вычисляется множество оптимальных периодичностей ПЗ и ПР и соответствующее им множество минимальных значений математического ожидания целевой функции. Затем при заданном коэффициенте K определяется диапазон нижних и верхних значений периодичности и устанавливается зона условно-оптимальных значений параметров ПЗ и ПР.

5. По *P*-критерию:
- в случае вероятностно-определенных задач вычисляется допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ и ПР;
- в случае вероятностно-неопределенных задач для множества функций распределения *F* определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности ПЗ и ПР и из него выбирается наименьшее.

6. Полученные по *C*- и *P*-критериям значения сравниваются, и определяется зона целесообразных значений периодичности ПЗ и ПР.

7. Производится анализ полученной зоны целесообразных значений и принятие окончательного решения о практически оптимальных значениях параметров ПЗ и ПР.

Проиллюстрируем решение оптимизационных задач на этапах 4, 5 и 6.

Задачи 11 и 12. По *C*-критерию находится оптимальное значение периодичности ПЗ (ПР) τ_o и минимальное значение целевой функции C_o, а по *P*-критерию – допустимое по условиям безопасности значение периодичности ПЗ (ПР) $\tau_д$. Тогда целесообразные значения периодичности $\tau_ц$ лежат в диапазоне: при $\tau_o < \tau_д$ $\tau_o \le \tau_ц \le \tau_д$, а при $\tau_o > \tau_д$ $\tau_ц \le \tau_д$.

Задача 13. По *C*-критерию определяется τ_o и C_o, а также при заданном коэффициенте *K* нижнее $\underline{\tau}_o$ и верхнее $\bar{\tau}_o$ значения ПЗ (ПР). По *P*-критерию определяется $\tau_д$. Тогда получаем: 1) при $\bar{\tau}_o < \tau_д$ $\underline{\tau}_o \le \tau_ц \le \bar{\tau}_o$; 2) при $\underline{\tau}_o < \tau_д < \bar{\tau}_o$ $\underline{\tau}_o \le \tau_ц \le \tau_д$.; 3) при $\underline{\tau}_o > \tau_д$ $\tau_ц \le \tau_д$.

На рис. 1 представлен принцип решения задачи 13 для случая 1, из которого видно, что целесообразные значения периодичности при заданной точности оптимизации *K* определенные по *C*-критерию находятся в диапазоне $\underline{\tau}_o$, ..., $\bar{\tau}_o$. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности ПЗ (ПР) является критерий минимума удельных эксплуатационных затрат.

Задачи 21, 22, 31 и 32. По *C*-критерию для множества функций распределения $\{F^1,F^2,...,F^n\}$ определяется множество оптимальных значений периодичности $\{\tau_o^1,\tau_o^2,...,\tau_o^n\}$ и соответствующее ему множество минимальных значений целевой функции $\{C_o^1,C_o^2,...,C_o^n\}$. Зона условно-оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений $\tau_o^{min}...\tau_o^{max}$. По *P*-критерию определяется множество допустимых по условиям безопасности значений периодичности $\{\tau_д^1,\tau_д^2,...,\tau_д^n\}$ и из него выбирается наименьшее $\tau_д^{min}$. Тогда получаем: 1) при $\tau_o^{max} < \tau_д^{min}$ $\tau_o^{max} \le \tau_ц \le \tau_д^{max}$; 2) при $\tau_o^{min} < \tau_д^{min} < \tau_o^{max}$ $\tau_o^{min} \le \tau_ц \le \tau_д^{min}$; 3) при $\tau_o^{min} > \tau_д^{min}$ $\tau_ц \le \tau_д^{min}$.

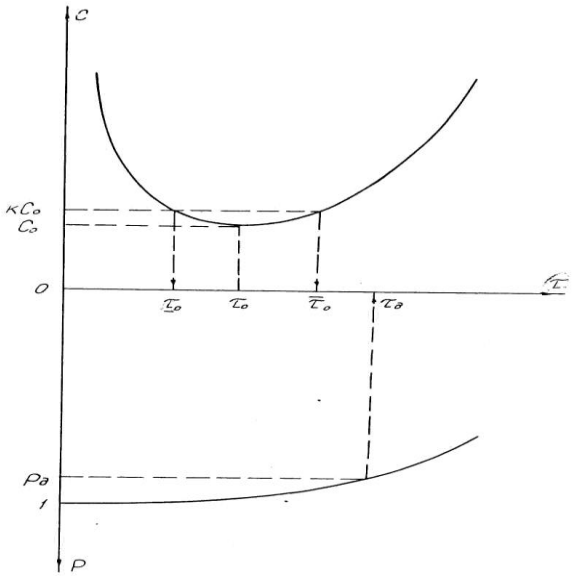


Рис. 1

На рис. 2 представлен принцип решения задач 21, 22, 31 и 32 для случая 3 при трех функциях распределения *F*. Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений $0...\tau_д^{min}$, определенных по *P*-критерию. Таким образом, в данном случае определяющим при выборе периодичности является критерий безопасности.

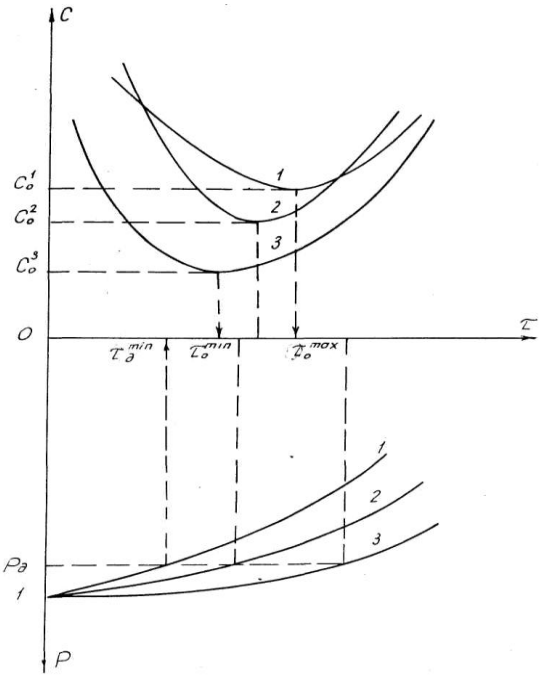


Рис. 2

Задачи 23 и 33. По *C*-критерию для множества $\{F^1,F^2,...F^n\}$ определяется множество $\{\tau_o^1,\tau_o^2,...,\tau_o^n\}$ и соответствующее ему множество $\{C_o^1,C_o^2,...,C_o^n\}$, а также при заданном *K* множество верхних и нижних значений периодичности

$\{\underline{\tau}_o^1, \bar{\tau}_o^1; \underline{\tau}_o^2 \bar{\tau}_o^2; \ldots; \underline{\tau}_o^n, \bar{\tau}_o^n\}$. Зона условно-оптимальных значений периодичности определяется диапазоном значений $\underline{\tau}_o^{min} \ldots \bar{\tau}_o^{max}$. По *P* - критерию определяется множество $\{\tau_\partial^1, \tau_\partial^2, \ldots, \tau_\partial^n\}$ и из них выбирается τ_∂^{min}. Тогда получаем:

1) при $\bar{\tau}_o^{max} < \tau_\partial^{min}$ $\underline{\tau}_o^{min} \le \tau_ц \le \bar{\tau}_o^{max}$;

2) при $\underline{\tau}_o^{min} < \tau_\partial^{min} < \bar{\tau}_o^{max}$ $\underline{\tau}_o^{min} \le \tau_ц \le \tau_\partial^{min}$;

3) при $\underline{\tau}_o^{min} > \tau_\partial^{min}$ $\tau_ц \le \tau_\partial^{min}$.

На рис. 3 представлен принцип решения задач 23 и 33 для случая 2 при трех функциях распределения. Из рисунка видно, что целесообразные значения периодичности находятся в диапазоне значений $\underline{\tau}_o^{min} \ldots \tau_\partial^{min}$, определенных по *C*- и *P*-критериям. Таким образом, в данном случае можно обеспечить как экономически целесообразное при заданной точности оптимизации значение удельных эксплуатационных затрат, так и заданное по условиям обеспечения безопасности значение вероятности безотказной работы ТУ.

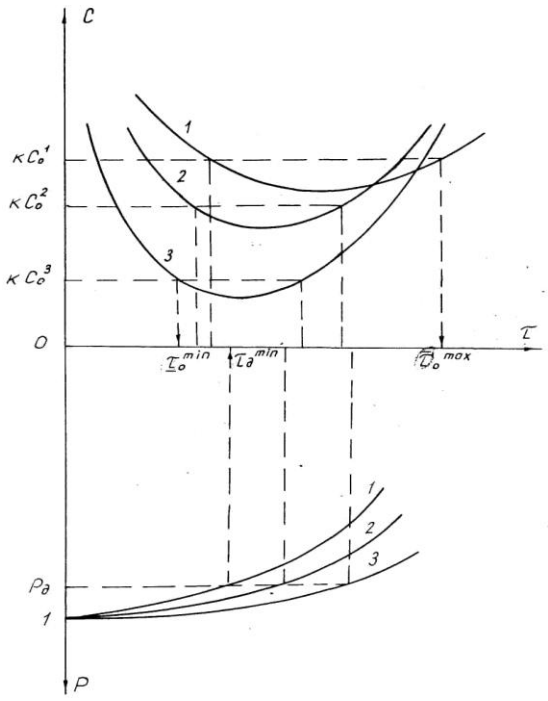


Рис. 3

Заключение

В рамках комплексного подхода основными критериями оптимизации предупредительных замен и ремонтов целесообразно считать минимум удельных эксплуатационных затрат и допустимый по условиям обеспечения безопасности уровень вероятности безотказной работы технических устройств.

Решение задачи оптимизации ПЗ и ПР усложняется из-за неопределенности исходной информации, которая проявляется в погрешности численных значений параметров целевой функции и в недостоверном описании функций распределения показателей надежности. Неопределенность исходной информации повышает размерность задачи, приводит к неоднозначности результатов её решения и выбора периодичности ПЗ и ПР технических устройств.

Решение вероятностно-неопределенных задач оптимизации ПЗ и ПР целесообразно свести к их вероятностно-определенному эквиваленту путем задания диапазона значений параметров целевой функции или коэффициента точности оптимизации и выбора наиболее вероятных функций распределения показателей надежности.

Целью формализованного решения вероятностно-неопределенных задач является определение зоны условно-оптимальных значений периодичностей ПЗ и ПР, ширина которой зависит от степени определенности исходной информации. Окончательный выбор решений должен проводиться специалистами с привлечением дополнительных неформализованных критериев.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование операций / ред. Дж. Моудер. – М. : Мир, 1981. – 667 с.
2. Мелентьев Л. А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. – М. : Высш. шк., 1983. – 319 с.
3. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы обработки данных. – М. : Мир, 1980. – 612 с.
4. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. – М. : Сов. радио, 1969. – 488 с.
5. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. – М. : Сов. радио, 1971. – 272 с.
6. Барзилович Е. Ю., Каштанов В. А. Организация обслуживания при ограниченной информации о надежности систем. – М. : Сов. радио, 1975. – 136 с.

УДК 621

Исаев Александр Иванович,
д-р техн. наук, профессор, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, тел. 89149383927
Сафарбаков Андрей Мирсасимович,
канд. техн. наук, доцент ИрГУПС,
тел. 89148874327, e-mail: safarbakov@yandex.ru
Богданович Денис Васильевич,
к. ф.-м. н., доцент, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, тел.: 89149412998
Майрович Юрий Игоревич,
соискатель, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации

ИМПУЛЬСНАЯ КАМЕРА СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

A.I. Isaev, A.M. Safarbakov, D.V. Bogdanovich, Y.I. Mairovich

THE GAS TURBINE ENGINE PULSE COMBUSTOR

Аннотация. *Газотурбинные двигатели, применяемые в авиации, имеют повышенные расходы топлива и вызывают большой выброс в атмосферу вредных веществ. Для повышения экономичности и снижения выбросов вредных веществ газотурбинных двигателей предложено камеру сгорания непрерывного действия заменить на импульсную камеру сгорания. В статье рассмотрены вопросы аэродинамики импульсной камеры сгорания газотурбинного двигателя.*

Ключевые слова: *газотурбинный двигатель, импульсная камера сгорания, завихритель, зона обратных токов, обратный клапан.*

Abstract. *Gas turbine engines used in aviation have excessive fuel consumption and cause high emissions of pollutants. To increase economy and lower emissions of harmful substances it is proposed to replace the turbine engine combustion chamber by a continuous pulse combustor. The questions of the gas turbine engine pulse combustor aerodynamics are considered.*

Keywords: *gas turbine engine, pulse combustor, vorticity solvent, zone of reverse flow, check valve.*

Существует много типов камер сгорания (КС) для газотурбинных двигателей, существенно различающихся по размерам, схемам и способам подачи топлива. Однако всем камерам сгорания присущи общие аэродинамические характеристики. Так, для всех КС воздух из-за компрессора поступает в жаровую трубу через фронтовое устройство, выполненное в виде топливной форсунки и завихрителя вокруг нее. В диффузорах и кольцевых каналах камер сгорания следует уменьшать скорость потока и распределять воздух по всем зонам горения в заданных количествах, поддерживая одинаковые условия течения без паразитных отрывных зон и связанных с ними потерь давления. Внутри жаровой трубы необходимо обеспечить существование большой циркуляционной зоны или зоны обратных токов (ЗОТ) для стабилизации пламени, эффективное разбавление продуктов сгорания и экономичное использование воздуха, охлаждающего стенки.

Импульсная камера сгорания представляет собой трубчатую КС, у которой фронтовое устройство выполнено в виде обратного клапана, служащего для обеспечения импульсной подачи воздуха в жаровую трубу из-за компрессора (рис. 1).

Воздух, попадая во входное устройство КС, проходит через профилированные отверстия в седле обратного клапана и попадает в диффузор. Скорость его при этом существенно уменьшается. Далее воздушный поток упирается в тарельчатый клапан, смещает его вдоль оси, открывая проход в КС, и зажимает возвратную пружину. В данном случае тарелка обратного клапана является плохо обтекаемым телом, которое создает зону обратных токов в камере сгорания (рис. 2). В этом случае ЗОТ находится внутри кривой ОВС. Точку В называют точкой торможения. С внешней стороны от линии ОВС находится основной поток, который поддерживает циркуляционное движение вдоль сплошной границы ОВС. Следовательно, максимальное значение напряжения сдвига, характеризующего циркуляционное течение в ЗОТ, соответствует точке О и С. Вдоль потока, по длине КС, все составляющие скорости уменьшаются. За точкой торможения В возвратного течения нет, а

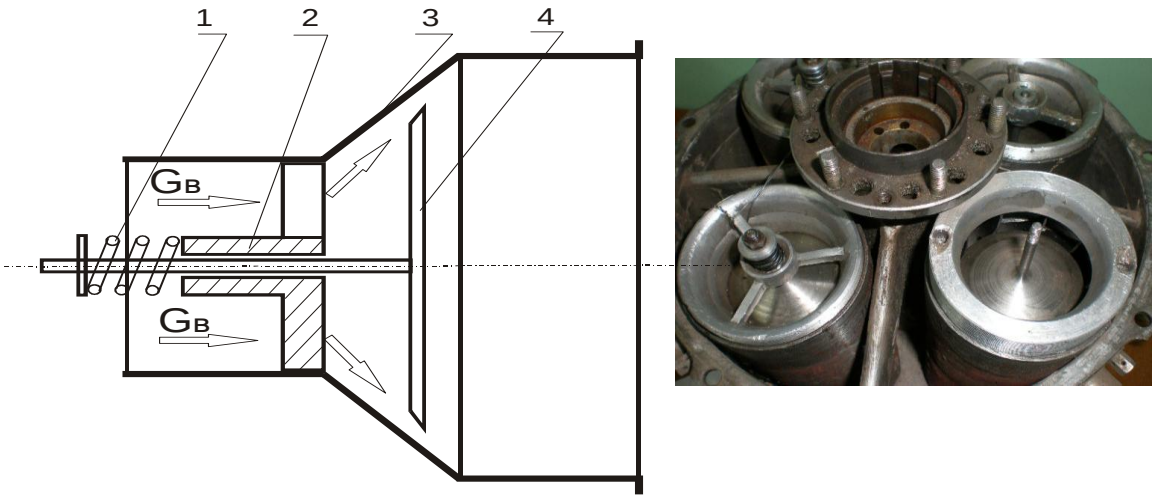


Рис. 1. Фотография и схема фронтового устройства импульсной камеры сгорания:
1 – возвратная пружина, 2 – седло обратного клапана, 3 – диффузор, 4 – тарельчатый клапан

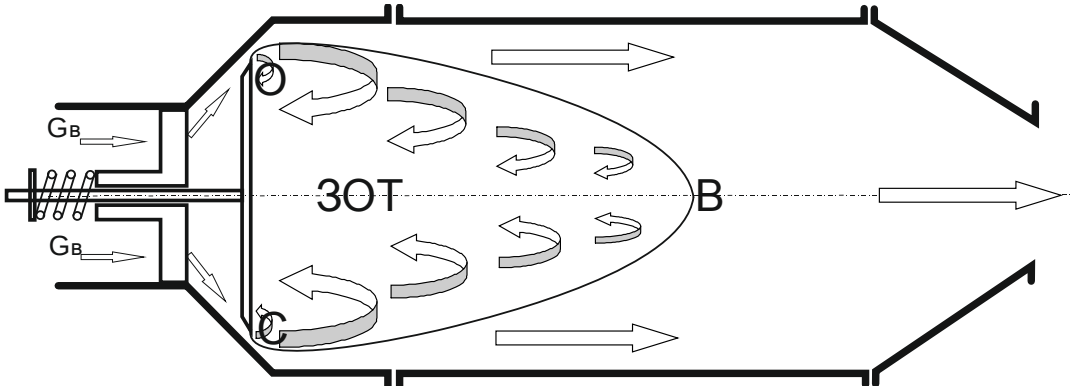


Рис. 2. Зона обратных токов в камере сгорания за тарельчатым клапаном

далее по потоку происходит обыкновенное турбулентное течение, которое выносит вещество из КС.

В данном случае размер зоны обратных токов во многом зависит от формы тарелки клапана, от скорости воздушного потока и от площади проходного сечения между диффузором камеры сгорания и тарелкой клапана.

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что в случае обтекания потоком тарелки обратного клапана зона обратных токов занимает по длине камеры сгорания от 0,8 до 1,1 $D_{экв}$ (фото 1, 2), где $D_{экв}$ (диаметр эквивалентный) – характерный линейный размер, к которому относятся все другие линейные величины $D_{экв} = D_T$, D_T – диаметр тарелки клапана.

Процессы образования топливо-воздушной смеси (ТВС) в камере сгорания играют важную роль в зонах горения и разбавления. Хорошее смешение ТВС в первичной зоне горения необходимо для обеспечения высоких скоростей горения и минимизации образования сажи и окислов азота, а хорошее смешение продуктов горения с воздухом в зоне разбавления существенно для обеспечения равномерности температуры газов в выходном сечении камеры. К сожалению, хорошее смешение газов требует значительных длины камеры и потерь давления. Следовательно, при проектировании импульсной камеры сгорания необходимо осуществить удовлетворительное перемешивание ТВС по всей ее длине для обеспечения устойчивого горения с минимальными потерями давления и при минимальной длине камеры.

Основным требованием к импульсной камере сгорания является стабилизация пламени в широком диапазоне режимов работы двигателя. На устойчивость горения определяющее влияние оказывает структура течения в первичной зоне камеры. В этой зоне должно быть наличие торроидального циркуляционного течения или зон обратных токов, которые вовлекают в себя часть продуктов сгорания и перемешивает их с поступающим воздухом и топливом. Эта зона непрерывно пополняется свежим воздухом, который подается в жаровую трубу через обратный клапан.

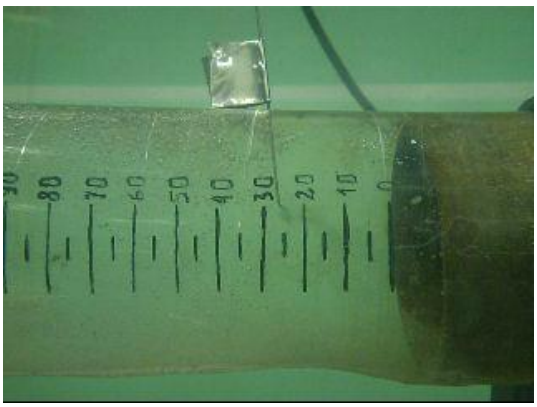


Фото 1. Зона обратных токов за тарельчатым клапаном

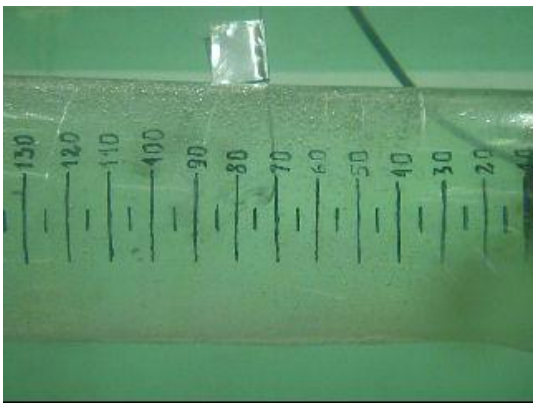


Фото 2. Турбулентное течение за точкой полного торможения

Увеличить длину зон обратных токов в КС можно при помощи установки завихрителя. Завихритель представляет собой устройство, имеющее элементы, закручивающие воздух или топливно-воздушную смесь для осуществления процесса горения в камере сгорания (ГОСТ 23851-79). В данном случае в качестве элементов, закручивающих воздух, применяются профили, передняя часть которых ориентирована по направлению воздушного потока, выходящего из компрессора высокого давления, а концевик имеет угол закрутки, позволяющий завихрить поток.

Одним из наиболее эффективных способов создания ЗОТ в первичной зоне является использование завихрителя в головной части камеры вокруг топливной форсунки. В импульсной КС завихритель устанавливается следом за диффузором по всей окружности обечайки жаровой трубы (рис. 3, фото 3).

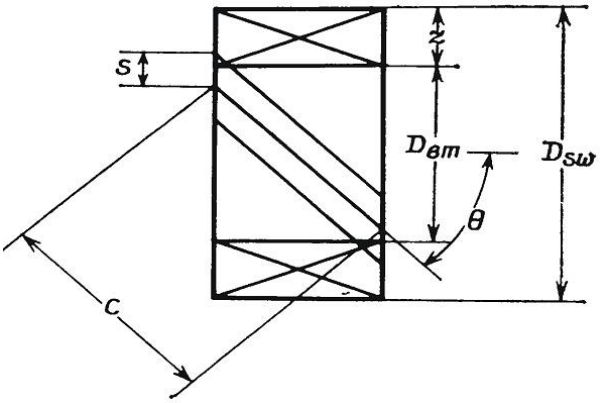


Рис. 3. Схема завихрителя. Показаны только три лопатки: θ – угол выхода из завихрителя; c – хорда лопатки; s – шаг установки лопаток; z – высота лопатки завихрителя; $D_{вт}$ – внутренний диаметр завихрителя; D_{sw} – внешний диаметр завихрителя под обечайку жаровой трубы

Фото 3. Завихритель

Образование вихря в закрученных течениях приводит к образованию ЗОТ в центральной области потока, если сообщаемая закрутка становится большой. Циркуляционная зона, создаваемая таким образом, обеспечивает лучшее перемешивание газов, чем в других способах (например, при помощи плохо обтекаемых тел), так как вращательные составляющие скорости создают области сильного сдвига течения с высоким уровнем турбулентности и большой скоростью массообмена. Это свойство закрученных течений используется на практике для повышения устойчивости и интенсивности горения. Зоны обратных токов в этом случае имеют большую протяженность по длине камеры сгорания (рис. 4).

При проведении экспериментальных исследований по выявлению аэродинамических характеристик импульсной камеры сгорания были выявлены факторы, которые оказывают существенное влияние на размеры зоны обратных токов. Это:

- угол выхода из завихрителя θ;
- высота лопаток завихрителя z;
- шаг установки лопаток на малых углах выхода из завихрителя s;

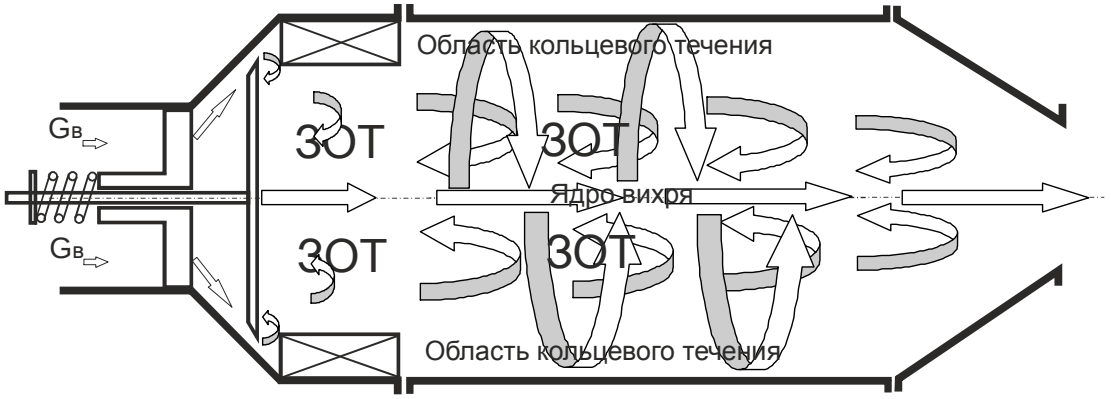


Рис. 4. Импульсная камера сгорания с завихрителем

- площадь входа воздуха в камеру сгорания $F_{вх}$;

- площадь выходного сечения из камеры сгорания $F_{вых}$.

Эксперимент по выявлению аэродинамических характеристик импульсной КС проводился в гидробассейне. Рабочее тело – вода. В качестве исследуемого образца был изготовлен макет импульсной КС с соблюдением геометрического подобия. При проведении эксперимента соблюдались кинематическое и динамическое подобие. Кинематическое подобие построено на подобии полей скоростей и геометрическом подобии линий тока во всей области рассматриваемого течения. Динамическое подобие построено на соблюдении равенства отношений векторов сил в сходственных точках в сходственные моменты времени.

Течение жидкости в макете КС визуализировалось посредством введения подкрашенной жидкости в поле течения.

Эксперимент проводился путем изменения одного из параметров при фиксированных значениях других параметров. При проведении экспериментальных исследований изменялся параметр угла выхода из завихрителя θ при фиксированных значениях параметров высоты лопаток завихрителя z, шага установки лопаток на малых углах выхода из завихрителя s, площади входа воздуха в камеру сгорания $F_{вх}$, площади выходного сечения из камеры сгорания $F_{вых}$.

Экспериментальные исследования для получения качественной картины течения в импульсной камере сгорания проводились следующим образом. Через модель камеры сгорания при определенном значении всех влияющих на структуру течения параметрах задавался определенный расход жидкости G_B. При помощи подкрашенной жидкости визуализировались поля течений и выявлялись геометрические размеры ЗОТ. Затем изменялся параметр угла выхода из завихрителя и исследования продолжались. Для проведения эксперимента были изготовлены завихрители с углами выхода 30, 45, 60, 70 и 80 градусов.

В результате проведенных исследований установлено, что все типы перечисленных завихрителей создают ЗОТ по всей длине камеры сгорания. Структура течения при этом несколько отличается от структуры течения в КС, где фронтовое устройство выполнено в виде топливной форсунки и завихрителя вокруг нее. В отличие от таких КС, в импульсных существует протяженная по всей длине КС зона кольцевого течения (фото. 4). Под зоной кольцевого течения по всей длине камеры сгорания располагается ЗОТ (фото. 5, 6), и внутри нее примерно по оси КС существует срединный вихрь, который выносит из КС вещество (фото 7). При таком расположении завихрителя в КС точки полного торможения потока не существует. Так как невозможно найти точку полного торможения потока, а ЗОТ существует по всей длине КС, то геометрические характеристики ЗОТ необходимо оценивать по площади, занимаемой по длине КС.

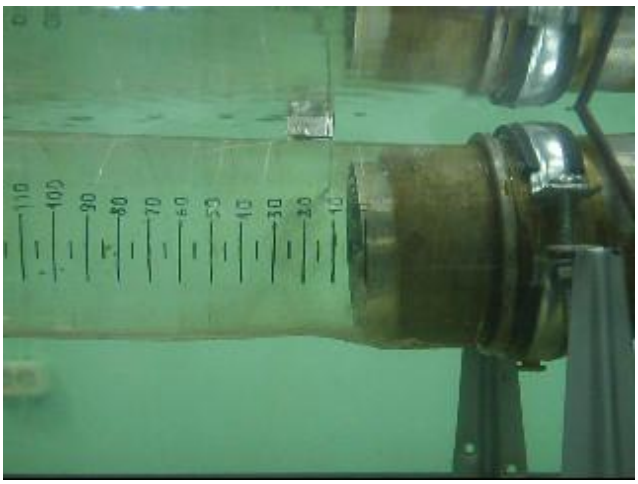


Фото. 4. Кольцевое течение

Фото. 5. Зона обратных токов на удалении 3 см от завихрителя

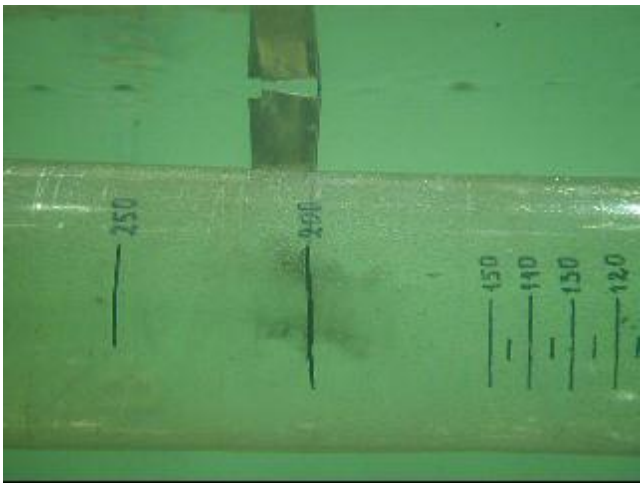


Фото. 6. Зона обратных токов на удалении 20 см от завихрителя

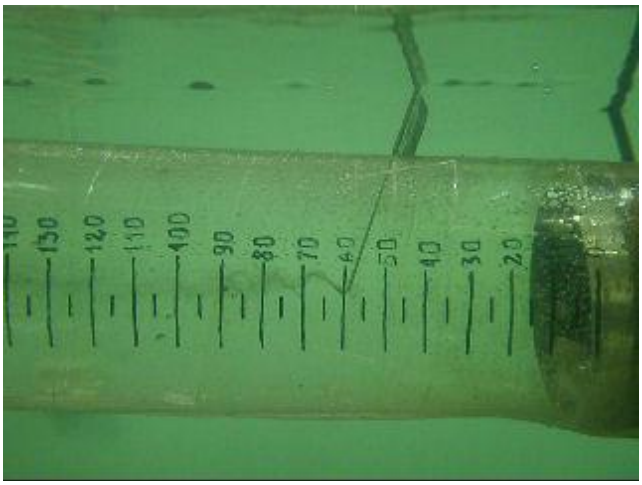


Фото. 7. Срединный вихрь выносящий вещество

При проведении экспериментальных исследований была оценена площадь ЗОТ по длине камеры сгорания для установленных типов завихрителей (рис. 5).

Анализируя данный график, можно заметить, что площадь ЗОТ больше у фронтового устройства камеры сгорания. Объяснить это можно значениями скоростей кольцевого течения потока, вышедшего из завихрителя. Чем больше скорость кольцевого течения, тем больше напряжение сдвига, тем интенсивнее циркуляционное течение в застойной зоне, тем больше площадь ЗОТ. По мере удаления от фронтового устройства площадь циркуляционного течения уменьшается. Связано это с уменьшением значения скоростей в кольцевом течении вдоль камеры сгорания. Уменьшается напряжение сдвига, тем самым снижается интенсивность циркуляционного движения, и снижается площадь ЗОТ. Аналогичные графики построены

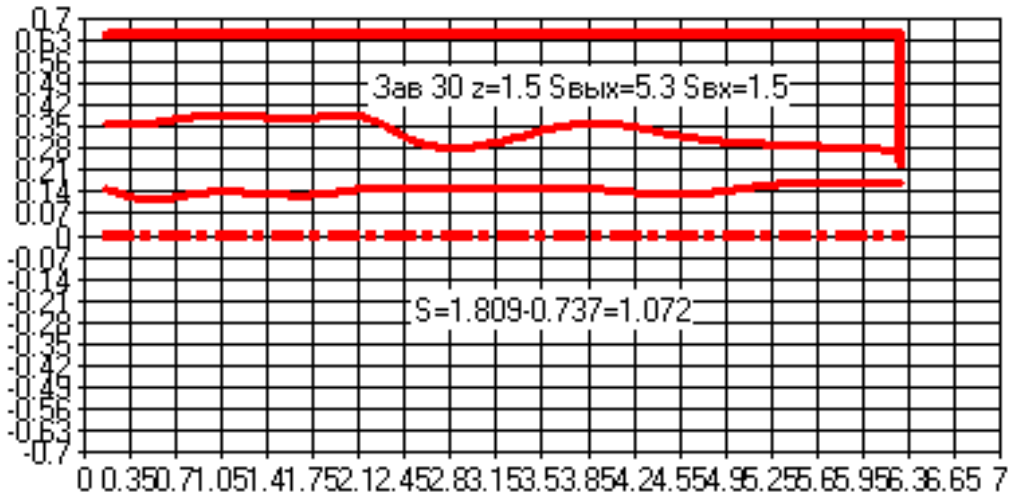


Рис. 5. Площадь ЗОТ для завихрителя с углом выхода 30 градусов

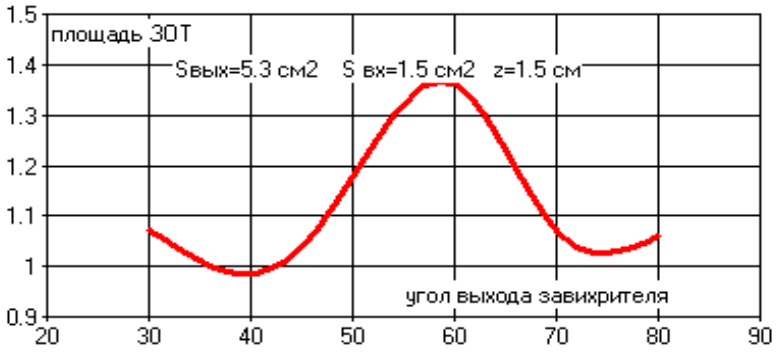


Рис. 6. Влияние угла выхода из завихрителя на площадь ЗОТ

для завихрителей 45, 60, 70 и 80 градусов. Отличие их заключается в различном значении площадей зон обратных токов. Обобщая данные графики, можно построить график влияния угла выхода из завихрителя на площадь зон обратных токов (рис. 6). Анализ данного графика показывает, что наибольшей площадью зон обратных токов обладает КС, в которой угол выхода из завихрителя θ соответствует 60 градусам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД : пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 566 с. : ил.
2. Нечаев Ю. Н. Теория авиационных двигателей. – М. : Воениздат, 1990.
3. Kilik E. The Influence of Swirier Design Parameters on the Aerodynamics of the Downstream Recirculation Region / Ph.D. thesis, School of Mechanical Engineering ; Cranfield Institute of Technology. – England, 1976.

УДК 66.021

Васильев Артем Виниаминович,
аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии, e-mail: art9am@gmail
Бальчугов Алексей Валерьевич,
д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических производств
Ангарской государственной технической академии, e-mail: balchug@mail.ru

РАЗРАБОТКА НОВОЙ РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ С ЭФФЕКТОМ ЭЖЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

A.V. Vasiliev, A.V. Balchugov

DEVELOPMENT OF A NEW REGULAR PACKING WITH EJECTION EFFECT FOR HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES

Аннотация. *Разработана новая регулярная насадка с эффектом эжектирования для тепло- и массообменных процессов. Исследовано взаимодействие потоков газа и жидкости на новой насадке. Показано, что в предлагаемой насадке создаются благоприятные условия для протекания процессов тепло- и массообмена.*

Ключевые слова: *насадка, массообмен, эжектирование.*

Abstract. *New regular packing with ejection effect for heat and mass transfer processes was developed. Influence of the interaction of gas and liquid in the new packing was investigated. It is shown, that in the new packing favorable conditions for the foresight of heat and mass transfer are created.*

Keywords: *packing, mass transfer, ejection.*

Предлагаемое изобретение относится к конструкциям регулярных насадок, применяемых для проведения тепло- и массообменных процессов в системе газ (пар) – жидкость, таких

как ректификация, абсорбция, очистка и осушка природного газа [1].

Насадка состоит из собранных в пакеты гофрированных листов, установленных вертикально, вершинами гофр друг к другу (рис. 1).

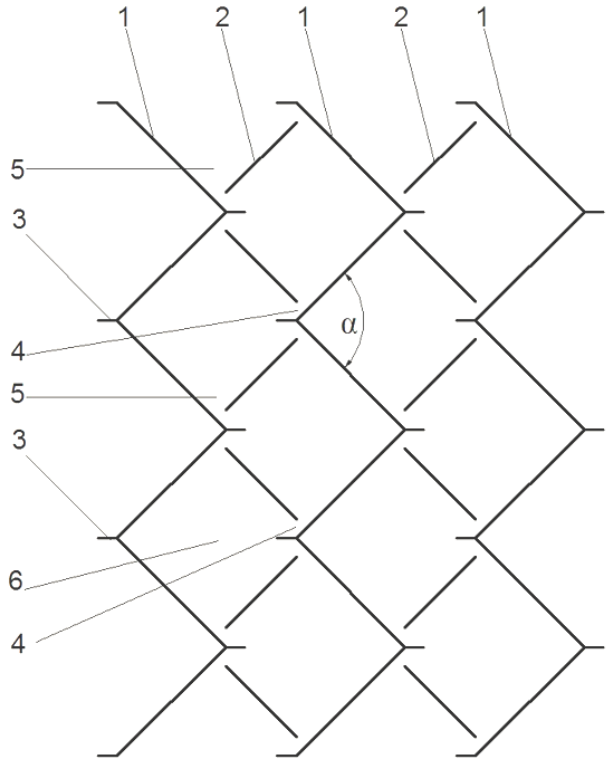


Рис. 1. Регулярная насадка для масообменных процессов

При этом используются гофрированные листы двух видов, установленные попеременно. В листах проделаны вырезы таким образом, чтобы стал возможен вход вершин гофр листа первого вида (1) в прорези вершин гофр листа второго вида (2) с образованием щелей между ними. На вершинах гофр листов первого вида имеются небольшие горизонтальные площадки (3). При сборке пакета насадки вершинами гофр листа первого вида и вырезами гофр листа второго вида образуются щели. В собранном виде гофрированные листы образуют горизонтальные, ромбовидные каналы и вертикальные, зигзагообразные каналы.

Угол сгиба α гофрированных листов может быть различным, на рис. 1 приведено изображение насадки, выполненной с углом сгиба α, равным 90º.

Гофрированный лист второго вида (2) выполнен следующим образом: в вершинах гофр просечкой проделаны прорези (4). Прорези имеют одинаковую форму. Размеры прорезей (4) могут варьироваться и подбираться в зависимости от свойств среды, расхода жидкости и газа (пара). При обработке загрязненных сред, когда возможно забивание и закоксовывание, размер прорезей может быть увеличен. Данная конструкция гофрированных листов позволяет выполнять стыковку листов вида (1) и (2). Для уменьшения гидравлического сопротивления слоя насадки возможно проделывание просечек вдоль на сторонах гофр на листе второго вида (2).

Насадка работает следующим образом. Жидкость стекает сверху вниз, накапливаясь в нижней части ромбовидных каналов и образуя плоские струи при истечении с площадок (3). Таким образом, весь пакет гофрированных листов частично заполняется жидкостью, и определенный уровень жидкости постоянно присутствует в ромбовидных каналах. При этом жидкость стекает зигзагообразно, постоянно изменяя направление, что способствует перемешиванию и увеличению интенсивности тепло- и массообмена. Газ поднимается снизу вверх по зигзагообразным каналам, эжектируя жидкость, стекающую с площадок (3). Газ устремляется в область (6), при этом захватывает стекающую жидкость с площадок (3), тем самым создавая эффект эжектирования. Он не может пройти через прорези (4), так как ему препятствует слой жидкости, который постоянно присутствует в ромбовидных каналах (в области (5)), а также некоторое препятствие создает наклон вверх площадки (3) (до 10º). Взаимодействие газа и жидкости осуществляется в ромбовидных каналах. При истечении с площадки (3) сначала струи жидкости и газа движутся параллельно, прямоточно, а затем ударяются о противоположную стенку, интенсивно перемешиваясь. Это приводит к увеличению интенсивности процессов тепло- и массообмена и повышению эффективности работы насадки. Это, в свою очередь, приведет к снижению габаритов аппарата.

Взаимодействие газа и жидкости (рис. 2) в ячейке (ромбовидном горизонтальном канале) происходит в три этапа.

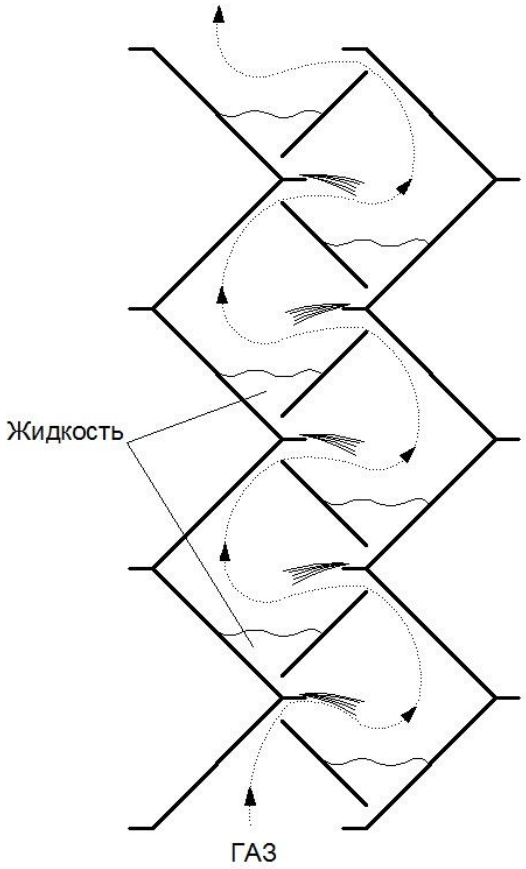


Рис. 2. Схема потоков газа и жидкости на новой насадке

Первый этап состоит в прямоточном контакте двух параллельных горизонтальных плоских струй газа и жидкости, истекающих с площадки (3). При этом плоская горизонтальная струя жидкости как бы лежит на плоской горизонтальной струе газа. На втором этапе происходит удар двух струй о противоположную стенку ячейки, при этом происходит интенсивное перемешивание потоков. На третьем этапе потоки газа и жидкости разделяются, газ выходит через отверстие вверху ячейки, а жидкость – через нижнее отверстие.

С точки зрения математического моделирования взаимодействие потоков на первом этапе, когда плоские струи газа и жидкости в течение некоторого времени движутся прямоточно, можно рассматривать с позиций модели кратковременного контакта фаз [2, 3]. Данная модель предполагает, что взаимодействие элементов потоков происходит нестационарно в течение некоторого времени τ. При этом массоперенос описывается уравнением нестационарной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \qquad (1)$$

где c – концентрация компонента в жидкости, кмоль/м^3; D – коэффициент диффузии, м^2/с; x – линейный размер, м.

В соответствии с моделью кратковременного контакта фаз предполагается, что к поверхности жидкости постоянно подходят свежие элементы жидкости, которые вытесняют порции жидкости, уже насыщенные поглощаемым компонентом. Таким образом, элемент жидкости находится в контакте с газом в течение очень короткого отрезка времени, когда глубина проникновения газа в жидкость мала сравнительно с толщиной слоя жидкости. При этом концентрация растворяемого компонента на поверхности жидкости остается постоянной, равной равновесной.

Интегрирование уравнения (1) дает выражение для коэффициента массоотдачи в жидкости [2, 3]:

$$\beta_{ж} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\frac{D}{\tau}}. \qquad (2)$$

Уравнение массоотдачи позволяет определить количество поглощенного компонента:

$$M = \beta_{ж} c^* F\tau = \frac{2c^* F}{\sqrt{\pi}}\sqrt{D\tau}, \qquad (3)$$

где c^* – равновесная концентрация компонента в жидкости, кмоль/м^3; F – поверхность контакта фаз, м^2.

По уравнениям (2–3) выполнен расчет для системы CO_2 – вода для следующих условий: равновесная концентрация углекислого газа в воде при температуре 20°С и давлении 1 ат составляет 0,117 кмоль/м^3 [4, 5]; коэффициент диффузии CO_2 в воде при 20 °С $1{,}8\times10^{-9}$ м^2/с [5]; длина струи 0,07 м; ширина струи 0,2 м. Результаты расчетов для различных скоростей струи представлены на рис. 3.

Результаты расчета по уравнениям (2) и (3) показывают, что при увеличении скорости струи количество поглощенного компонента на первом этапе снижается. Это связано со снижением времени пребывания жидкости в струе. Из этого не следует, что при увеличении скорости струи снизится общая эффективность массопередачи в ячейке, так как при этом возрастет кинетическая энергия струи и интенсивность перемеши-

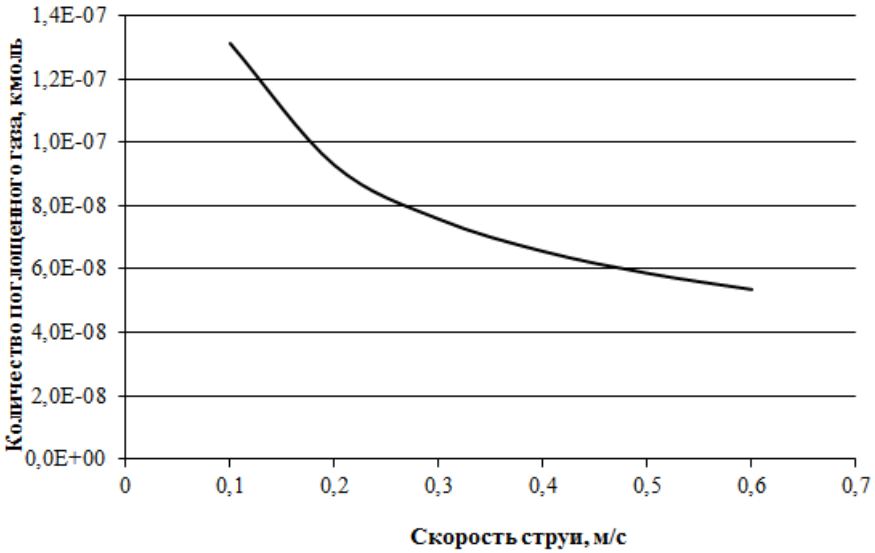


Рис. 3. Зависимость количества поглощенного газа на начальном участке от скорости струи

вания газа и жидкости при ударе струй о противоположную стенку. Эффективность массопереноса на следующих двух этапах взаимодействия газа и жидкости позволят выяснить дальнейшие экспериментальные исследования.

Принципиальная возможность работы насадки была подтверждена в ходе экспериментов на лабораторной установке. Установка содержала насадочный аппарат, напорную емкость с водой, баллон с газом (CO_2) и вентили. Пакет насадки состоял из трех гофрированных металлических листов высотой 0,15 м, шириной 0,10 м. Имелось три гофры на каждом листе, угол сгиба гофр составлял 90º. Шаг гофр составлял 0,05 м, высота гофр 0,03 м. Устанавливался расход жидкости, равный 150 мл/с, и расход газа 1 л/с. Через прозрачную стенку корпуса пакета насадки, выполненную из оргстекла, наблюдали за течением жидкости и газа. Проведенные эксперименты подтвердили принципиальную возможность работы насадки и доказали, что насадка обеспечивает эффективное взаимодействие газа и жидкости внутри ромбовидных каналов с образованием развитой поверхности контакта фаз.

В результате предварительных экспериментов установлено, что жидкость стекает с площадки (3) (рис. 1) в виде плоской струи, местами разрываемой потоком газа. Угол падения струи, как показали наблюдения, зависит от скорости потока газа. Чем больше скорость газа, тем ближе угол падения струи жидкости к 90° (к горизонтальному потоку). При более высокой скорости газа возможен изгиб струи жидкости вверх.

Площадку (3) (рис. 1) можно выполнить гофрированной, в этом случае поток жидкости разобьется на множество ниспадающих струй, что приведет к увеличению поверхности контакта газа и жидкости и изменит характер их взаимодействия.

Как указывалось выше, другим направлением совершенствования насадки может быть изготовление листов (2) (рис. 1) в перфорированном виде, с отверстиями или просечками. Это позволит увеличить свободное сечение насадки и, как следствие, снизить ее гидравлическое сопротивление. При этом изменится механизм взаимодействия газа и жидкости в ячейке. Струи газа и жидкости будут не параллельными друг другу, а будут взаимодействовать перекрестно, причем поток газа будет входить в ниспадающую пленку жидкости снизу под некоторым углом. Это должно привести к дополнительному дроблению потока жидкости и увеличению поверхности контакта фаз.

Конструктивные размеры новой насадки определяются расходом газа и жидкости. Размер прорезей (4) (рис. 1) будет зависеть также от загрязненности жидкости. Чем выше загрязненность, тем больше ширина прорези.

Таким образом, в новой конструкции регулярной насадки, выполненной из гофрированных листов, создаются благоприятные условия для протекания процессов тепло- и массообмена между газом и жидкостью, и можно заключить, что предложенная насадка окажется конкурентоспособной в сравнении с насадками известных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бальчугов А. В., Васильев А. В., Кузора И. Е. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов // Заявка о выдаче патента № 2011107769.
2. Аксельрод Ю. В. Газожидкостные хемосорбционные процессы. – М. : Химия, 1989 – 240 с.
3. Рамм В. М. Абсорбция газов. – М. : Химия, 1976. – 620 с.
4. Дж. Перри. Справочник инженера-химика. Т. 1. – Л. : Химия, 1969. – 640 с.
5. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л. : Химия, 1976. – 552 с.

УДК 004.896(06)

Молчанова Елена Ивановна,
д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информатики ИрГУПС, e-mail: moleli59@gmail.com
Федоров Вячеслав Викторович,
начальник отдела РиСПО ИрГУПС, e-mail: spawn_f@mail.ru
Щербаков Иван Вячеславович,
аспирант, ИрГУПС, e-mail: anti1am3r@gmail.com

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ГИБРИДНЫХ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ КАК WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ

E.I. Molchanova, V.V. Fedorov, I.V. Shcherbakov

METHODICAL APPROACH TO BUILDING HYBRID EXPERT SYSTEMS AS WEB-BASED APPLICATIONS

Аннотация. *Предложен методический подход к созданию гибридных экспертных систем как web-приложений. Подход основан на разработке унифицированной модели базы знаний, не привязанной к онтологии предметной области. В качестве решателя используется система CLIPS, взаимодействие оболочки экспертной системы с пакетами прикладных программ осуществляется с помощью специально разработанной программы – демона CLIPS.*

Ключевые слова: *гибридная экспертная система, база знаний, база данных, механизм логического вывода, пакеты прикладных программ.*

Abstract. *We propose a methodological approach to the development of hybrid expert systems as web-based applications. The approach is based on developing a unified model of the knowledge base unattached to the domain ontology. System of CLIPS is used as a solver, the interaction of expert system shell with the application package is carried out by using a specially designed program – daemon CLIPS.*

Keywords: *hybrid expert system, knowledge base, database, inference, application packages.*

Введение

В ИрГУПС выполняется разработка оболочки для создания гибридной экспертной системы (ЭС). Предметной областью разрабатываемой экспертной системы является рентгенофлуоресцентный метод анализа (РФА). Этот метод анализа химического состава вещества обладает развитой теорией и для решения своих задач традиционно привлекает аппарат математического моделирования, математическую статистику, теорию планирования эксперимента, системы управления базами данных. Создано множество пакетов прикладных программ (ППП) и специализированных программных комплексов (ПК), реализующих те или иные из перечисленных выше задач, например [1]. Вместе с тем, корректное применение разработанных программ является задачей высокопрофессиональной и требует привлечения экспертных знаний, что и обусловило необходимость выполняемой разработки.

Экспертная система обучения основам использования математических моделей возбуждения интенсивности рентгеновской флуоресценции через сеть Интернет может быть использована

сотнями специалистов на предприятиях промышленности при разработке методик анализа. Только отечественные рентгеновские спектрометры, выпущенные ЗАО «Научприбор», работают более чем на 500 предприятиях металлургии, цементной и стекольной промышленности, в машиностроении и в научных учреждениях. Кроме того, многие заводские лаборатории оснащены аналитическими комплексами импортного производства.

Таким образом, проектируемая ЭС является гибридной и представляет собой ПК, агрегирующий средства манипулирования знаниями и пакеты прикладных программ. Разработка таких систем являет собой задачу на порядок более сложную, чем разработка автономной ЭС. Здесь требуется разработать средства взаимодействия не просто разных пакетов, а различных методологий, что порождает целый комплекс теоретических и практических трудностей. В связи с этим, нам придется использовать симбиоз языков представления знаний: фреймы + ассоциативные сети + полный набор возможностей языка исчисления предикатов [2].

Постановка задачи

Обобщенная структура экспертной системы представлена на рис. 1. Реальные ЭС могут иметь более сложную структуру, однако блоки, изображенные на рисунке, непременно присутствуют в любой из них, поскольку представляют собой стандарт де-факто структуры современной ЭС [3]. Процесс функционирования ЭС можно представить следующим образом: пользователь, желающий получить необходимую информацию, через пользовательский интерфейс посылает запрос к ЭС; решатель, пользуясь базой знаний, генерирует и выдает пользователю подходящую рекомендацию, объясняя ход своих рассуждений при помощи подсистемы объяснений.

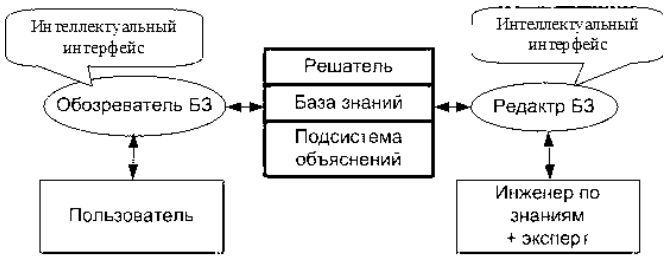


Рис. 1. Структура экспертной системы

Целью настоящих исследований является разработка методического подхода к созданию гибридной экспертной системы, предназначенной для работы в сети Интернет. В процессе анализа структуры проектируемой ЭС выделено пять подсистем: подсистема средств логического вывода (решатель), подсистема формализма представления знаний (БЗ), подсистема интеллектуального web-интерфейса с пользователем, подсистема интерфейса с ППП и подсистема объяснений.

Предлагаемые методы и подходы

Подсистема «решатель». Среди сложившихся подходов к построению средств вывода можно выделить следующие: от прикладной задачи, от модели или формализма представления знаний, от способа рассуждений экспертов, от класса задач или типов проблемных областей (ПрО), от вида обрабатываемых знаний и др. [4].

В ранних ЭС, широко описанных в литературе, например в [5], ориентированных на работу в конкретной ПрО, использовался подход «от прикладной задачи», позволявший наиболее точно учитывать специфику ПрО при реализации средств вывода. С появлением оболочек ЭС (первых инструментальных средств для построения ЭС) неявно декларировалось, что средства вывода, реализованные в них, и выбранная модель представления знаний одинаково хорошо подходят для решения уже целого класса неформализованных задач (НФ-задач) [4].

Создание специализированных инструментальных средств позволило строить ЭС, ориентированные как на конкретные классы НФ-задач, так и на определенные типы ПрО [4].

С усилением тенденций к интеграции различных систем и ЭС и гибридизации распространенных моделей представления знаний (фреймы, продукционные модели, нейронные сети и др.) соответственно усложнялись и средства вывода в составе прикладных ЭС [4]. Позднее наметилась тенденция к интеграции с подходами классического (императивного) программирования. Сближение парадигм традиционного программирования и искусственного интеллекта хорошо иллюстрируется разработкой языка R++ (C++ с добавлением правил) [6] и системы CLIPS (продукционная модель с добавлением объектно-ориентированных концепций) [7]. CLIPS (C Language Integrated Production System) – это инструмент разработки ЭС, созданный отделом программного обеспечения космического агентства NASA в Лондонском космическом центре имени Б. Джонсона.

Естественным развитием указанных тенденций явилось появление систем [8], в архитектурах которых к традиционным компонентам ЭС добавляется все разнообразие программных компонентов, реализующих методы прикладной математики и информационных систем. Предложенная в [9] задачно-ориентированная методология (ЗОМ) построения ЭС предполагает, что разработанные на ее основе системы поддерживают все этапы жизненного цикла в рамках единого системного под-

хода. Для удовлетворения описанным выше требованиям средства вывода в составе ИС должны, с одной стороны, сочетать в себе множество методов обработки знаний разного вида, а с другой – без вмешательства разработчика ИС позволять вносить изменения в алгоритмы вывода, обеспечивая достаточную гибкость и обладая разумной сложностью внесения изменений. Однако очевидно, как отмечают сами авторы работ [4, 9], что интеграция всех известных методов обработки знаний в рамках одной инструментальной среды невозможна ввиду их многообразия и гетерогенности. В текущей версии инструментального комплекса АТ-ТЕХНОЛОГИЯ [10], реализующего ЗОМ, средства вывода согласно концепции быстрого прототипирования оформлены в виде повторно используемого компонента (ПИК) – «универсальный решатель» (УР). На сегодняшний день УР может обрабатывать широкий спектр как достоверных, так и недостоверных знаний [9], однако выбор алгоритмов обработки знаний остается за разработчиком. Поскольку априори нельзя сказать, какой алгоритм больше подходит для конкретной задачи (скорее это можно выяснить только эмпирическим путем), то основной проблемой при формировании средств вывода становится невозможность быстрого внесения изменений в алгоритмы обработки знаний без перепрограммирования.

Таким образом, обсуждаемый выше подход, несмотря на всю сложность, трудно признать универсальным. В то же время, по требованиям к данной разработке, ЭС ориентирована на использование в сети Интернет, т. е. остается актуальной другая проблема – необходимость эксплуатации программного продукта с использованием весьма разнообразного перечня аппаратных средств. С этой точки зрения наиболее перспективным остается подход, реализованный в языке CLIPS. Хотя здесь не предусмотрена выработка байт-кодов, но предоставляется возможность создания готовой версии экспертной системы на стандартном языке С. Готовая версия может быть откомпилирована с помощью стандартного компилятора С для конкретной аппаратной платформы, после чего полученный исполняемый файл развертывается для эксплуатации на данной конкретной платформе. Это означает, что какая-либо «виртуальная машина CLIPS» не требуется. Одной из первоначальных целей проекта создания языка CLIPS была реализация использования этого языка для формирования экспертных систем, которые могут быть легко развернуты с применением любых новых аппаратных средств, которые когда-либо будут созданы [7].

Вторым безусловным преимуществом CLIPS является возможность интеграции экспертной системы с другими существующими программами. Это означает, что приходится учитывать необходимость обеспечения связи и координации входных и выходных потоков данных экспертной системы с указанными программами. Программы на языке CLIPS допускают полноценную эксплуатацию в качестве вызывающих или вызываемых программных модулей. Еще один вариант состоит в том, что можно использовать или модифицировать исходный код на языке CLIPS и встроить этот код в свое приложение, а затем откомпилировать полученное программное обеспечение и подготовить для развертывания новое приложение.

Подсистема формализма представления знаний. Проектирование подсистемы, управляющей работой БЗ, зависит от выбранной методологии моделирования предметной области. Под моделью предметной области понимается некоторая система, имитирующая структуру или функционирование исследуемой предметной области и отвечающая основному требованию – быть адекватной этой области [11]. При создании очень крупных систем, состоящих из тысяч правил, практически невозможно обойтись без онтологий. Онтология – это полное описание проблемной области, представленное с помощью формализованного способа [7].

Воспользуемся определением онтологии, предложенным в работе [12]. Онтология – набор определений фрагмента декларативных знаний на формальном языке, которые ориентированы на совместное многократное использование различными пользователями в своих приложениях:

$$O^I = \{C^I, R^I, D^I, DV^I, DT^I, A^I, P^I, Rap^I, Rdv^I\}, \quad (1)$$

где $C^I = \{c_1, \dots, c_n\}$ – конечное множество концептов (под концептом будем понимать конструкцию, состоящую из объектов одного класса);

$R^I = \{r_1 ..., r_m\}, R^I \subseteq C^I \times C^I, R^I = R_C{}^I \cup R_T{}^I \cup R_A{}^I$ – конечное множество бинарных отношений ri(cx, cy) между концептами;

$R_C{}^I \subseteq C^I \times C^I, R_C{}^I \subseteq R^I$ – бинарное отношение наследования, являющееся отношением частичного порядка множества концептов С;

$R^I \subseteq \{r_{T,i}, c_x, c_x\} \subseteq C^I \times C^I, R_A{}^I \subseteq R^I$ – бинарное отношение «часть – целое»;

$R_A{}^I \subseteq C^I \times C^I, R_A{}^I \subseteq R^I$ – конечное множество ассоциативных отношений;

$D^I = \{d_1, \dots, d_q\}$ – конечное множество доменов;

$DV^I = \{dv_1, \dots, dv_u\}$ – конечное множество конкретных значений стандартного типа, включенных в некоторый домен;

$TD^I = D^I \cup \{srting, boolen, integer, symbol, lexeme, float, number, instance\text{-}name, instance, byte, word, text \ldots\}$

– множество типов данных, включающих множество доменов;

$A^I = \{a_1, ..., a_w\}, A^I \subseteq \begin{cases} C^I \times TD^I, \\ R^I \times TD^I \end{cases}$ – конечное множество атрибутов, т. е. бинарных отношений ai(cx, tdy) или ai(rx, tdy);

$P^I = \{p_1, \ldots, p_t\}$ – конечное множество конкретных свойств атрибута;

$R_{AP}{}^I \subseteq A^I \times P^I$ – бинарное отношение инцендентности между множествами атрибутов A и свойств атрибутов P;

$R_{DV}{}^I \subseteq D^I \times DV^I$ – бинарное отношение инцендентности между множествами доменов D и доменных значений DV.

Верхний индекс I указывает на предметную область.

В работах научных школ ИСИ СО РАН (Новосибирск) [12], ИСЭМ СО РАН (Иркутск) [13–15], РГГУ (Москва) [16] при проектировании БЗ онтология используется в качестве схемы хранилища данных. В этом случае схема базы данных повторяет структуру предметной области, а это означает, что при создании базы знаний для различных предметных областей приходится создавать различные базы данных (свою БД для каждой предметной области). Такой подход является не очень удобным, т. к. при разработке ЭС в новой предметной области потребуется каждый раз проектировать новую схему БД и разрабатывать соответствующий программный код, кроме того, каждая из созданных БД нуждается в администрировании. Здесь предлагается другой подход – использовать одну унифицированную схему БД для всех предметных областей. Результатом создания БЗ в среде CLIPS является текстовый файл, содержащий интерпретируемые команды. С этой целью разработана система шаблонов элементов языка CLIPS в виде иерархической комбинации фреймовых субиерархий. В процессе наполнения БЗ шаблоны хранятся в таблицах БД, а после завершения этого процесса генерируется результирующий текстовый файл. Для этого последовательно выполнено отображение онтологии предметной области в онтологию элементов языка CLIPS, а онтологию элементов языка CLIPS в онтологию реляционных отношений (рис. 2). Отношение – фундаментальное понятие реляционной модели данных. По этой причине модель и называется реляционной (от английского relation – отношение).

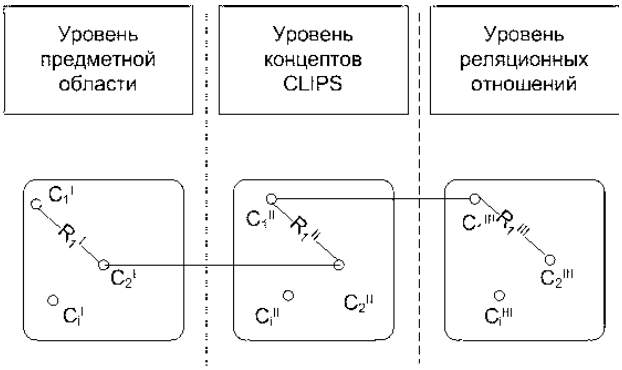


Рис. 2. Отображение онтологий

N-арным отношением *R*, или отношением *R* степени *n*, называют подмножество декартова произведения множеств, не обязательно различных. Исходные множества D1, D2, ..., Dn называют в модели доменами (в СУБД используется понятие «тип данных»).

Отношение имеет простую графическую интерпретацию, оно может быть представлено в виде таблицы, столбцы (поля, атрибуты) которой соответствуют вхождениям доменов в отношение, а строки (записи) — наборам из *n* значений, взятых из исходных доменов. Число строк (кортежей) называют кардинальным числом отношения (кардинальностью) или мощностью отношения.

Представим онтологию элементов языка CLIPS в виде иерархии (рис. 3).

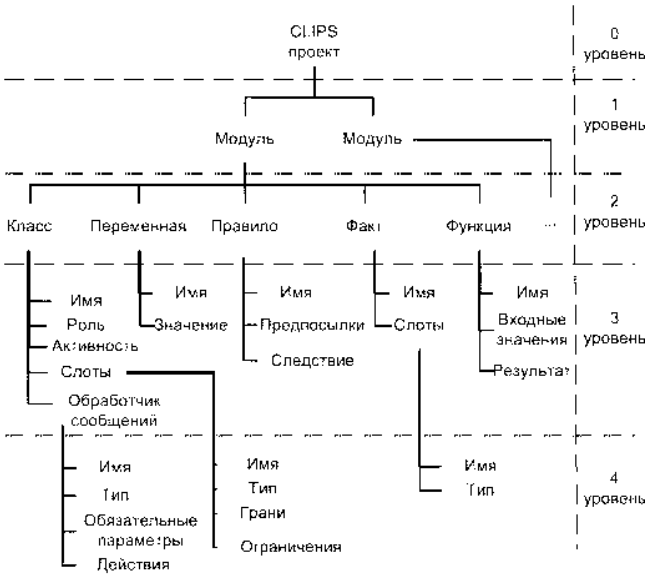


Рис. 3. Онтология элементов CLIPS

В предшествовавших исследованиях предложено каждый из элементов (концептов) CLIPS (уровень 2) представить в виде фрейма [17]. М. Минский определил фрейм как «структуру данных для представления стереотипных ситуаций» [18]. Фрейм служит средством, которое свя-

зывает декларативные и процедурные знания о некоторой сущности в структуру записей, которая состоит из слотов и наполнителей (filler). Структура фрейма представляется в виде:

$N:\{<S_1,V_1.P_1>,...,<S_k,V_k,P_k>,...,<S_n,V_n,P_n>\}$, (2)

где N – имя фрейма; $<S_k, V_k, P_k>$ (k = 1, ..., n) – слот; S_k – имя слота; V_k – значение слота; P_k – процедура.

Слоты – это структурные элементы фрейма, заполнение которых приводит к тому, что фрейм ставится в соответствие некоторой ситуации, явлению, объекту или процессу. Параметрами слота являются уникальное имя, значение, тип данных и наследование. Наследование определяет, какую информацию наследует данный слот из одноименного слота во фрейме верхнего уровня.

Имена фреймов и слотов обеспечивают интерпретируемость хранящихся во фреймах значений. Фреймы имеют свойство вложенности, т.к. значениями слота могут быть имена слотов более глубокого уровня. Значениями слотов могут быть приказы вызова процедур для активизации программ на основе имеющихся значений.

Таким образом, онтологию CLIPS можно определить как:

$$O^{II} = \{P^{II}, M^{II}, Cl^{II}, Co^{II}, R^{II}, F^{II}, Fn^{II}\}, \quad (3)$$

где верхний индекс II – указывает на онтологию языка CLIPS;

$P^{II}=\{p_1, ..., p_k\}$ – конечное множество проектов; определение проектов

$M^{II} = \{m_1,...,m_i\}, M^{II} \subseteq P^{II}$ – конечное множество модулей, составляющих проект;

$Cl^{II} = \{cl_1...,cl_j\}, Cl^{II} \subseteq M^{II}$, $Cl = \{S_K, V_K, P_K, Ro_K, A_K, Cs, G, Scl\}$ – конечное множество классов, составляющих модуль, где (k = 1, ..., j) – слот; S_k – имя слота; V_k – значение слота; P_k– процедура (обработчик сообщений), Ro_k – роль, A_k – активность; $C = \{cs_1, ... , cs_z\}$ – конечное множество ограничений; $G = \{g_1, ... , g_8\}$ – восемь граней класса; Scl — супер-класс;

$Co^{II} = \{co_1,...,co_x\}, Co^{II} \subseteq M, Co = \{S_K, V_K\}$ – конечное множество постоянных, составляющих модуль, где (k=1,...,x) – слот; S_k – имя слота; V_k – значение слота;

$R^{II} = \{rl_1...,rl_t\}, R^{II} \subseteq M^{II}, R = \{S_K, \mathrm{Pr}_K, Sl_K\}$ – конечное множество правил, составляющих модуль, где (k = 1,...,t) – слот; S_k – имя слота; Pr_k – предпосылки; Sl_k– следствия;

$F^{II} = \{f_1..., f_h\}, F^{II} \subseteq M^{II}, F = \{S_K, V_K, P_K, Cs\}$ – конечное множество фактов, составляющих модуль, где (k = 1, ..., h) – слот; S_k – имя слота; V_k – значение слота; P_k – процедура; $Cs = \{cs_1, ... , cs_k\}$ – конечное множество ограничений.

$Fn^{II} = \{fn_1..., fn_n\}, Fn^{II} \subseteq M^{II}, Fn = \{S_K, Vz_K, \mathrm{Re}z_K\}$. Конечное множество функций, составляющих модуль, где (k = 1 ,..., n) – слот; S_k – имя слота; Vz_k – входные значения; Rez_k– результат.

Между концептами могут существовать три типа отношений: агрегация, ассоциация, наследование. Отношения агрегации и наследования между концептами заложены в иерархии элементов языка CLIPS, представленных выше в виде фреймов. Кроме того, эти же отношения могут быть использованы при построении правил и обработчиков сообщений.

Под интеграцией понимаем процесс поиска связей между онтологиями [19].

Функция преобразования одной онтологии $O^I = \{C^I, R^I, D^I, DV^I, DT^I, A^I, P^I, R_{AP}{}^I, R_{DV}{}^I\}$ к другой $O^{II} = \{P^{II}, M^{II}, Cl^{II}, Co^{II}, R^{II}, F^{II}, Fn^{II}\}$ называется отображением онтологии [19] $F_{I\,II}:O^I \rightarrow O^{II}$.

Отображение может быть частичным в том смысле, что не для каждого понятия в исходной онтологии имеется эквивалент в другой онтологии. Полное отображение предполагает, что интерпретации, верные для онтологии O^{II}, верны и для онтологии O^I. Мы будем использовать полное отображение.

Чтобы определить схему реляционной БД для хранения БЗ, выполним декомпозицию элементов языка CLIPS, для чего используем реляционную операцию «проекция». Проекция происходит следующим образом: каждый концепт языка CLIPS уровней 0, 1 (рис. 3) выделен в самостоятельную сущность, элементы уровня 2 будут выделены в сущность с атрибутами уровня 3. Так же в сущности будут выделены те элементы уровня 3, которые имеют распространения на уровень 4.

Результатом будет онтология реляционных отношений БД, которую можно представить как:

$O^{III} = \{P^{III}, M^{III}, Cl^{III}, Cls^{III}, Co^{III}, R^{III}, F^{III}, Fs^{III}, Fn^{III}, Os^{III}\}$, здесь:

P^{III} – отношение проект;
M^{III} – отношение модуль;
Cl^{III} – отношение класс;
Cls^{III} – отношение слоты класса;
Co^{III} – отношение константы;
R^{III} – отношение правила;
F^{III} – отношение факты;
Fs^{III} – отношение слоты фактов;
Fn^{III} – отношение функция;
Os^{III} – отношение обработчик сообщений,

где индекс III указывает на онтологию реляционной базы данных.

Таким образом, нами выполнено последовательное отображение онтологий:

$$F_{I\,II}:O^{I} \rightarrow O^{II},\ F_{II\ \ III}:O^{II} \rightarrow O^{III}.$$

Отображение элементов онтологий представлено на рис. 4.

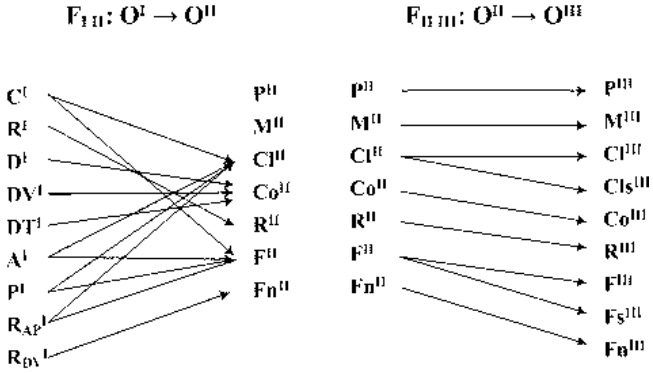


Рис. 4. Отображение элементов онтологий

Полученное на третьем уровне отображение онтологии предметной области соответствует логической модели БД, которая будет использоваться для хранения БЗ ЭС. Эта модель является унифицированной и подходит для широкого круга предметных областей в той мере, в которой их концептуальная структура может быть представлена с помощью онтологии, а отношения между концептами могут быть воспроизведены средствами языка CLIPS, с привлечением внешних функций из пакетов прикладных программ.

В качестве СУБД выбран MySQL5. Данный выбор обуславливается тем, что эта СУБД является платформонезависимой, не требует больших системных ресурсов, является свободно распространяемой, поддерживает создание связей между таблицами. Посредством web-сервера Apache и языка серверных сценариев php, БД может быть доступна инженеру по знаниям, а также пользователям ЭС, находящимся в любой удаленной точке земного шара.

Подсистема интеллектуального web-интерфейса с пользователем. Система CLIPS не обладает платформонезависимым графическим интерфейсом. Одним из инструментальных средств, результаты применения которого оказались очень успешными, является Protege – редактор онтологий и баз знаний. Это чрезвычайно сложное инструментальное средство предоставляется бесплатно Станфордским университетом. Система Protege используется вместе с TixCLIPS – интегрированной средой разработки для языка CLIPS, однако эта система не предназначена для многопользовательского доступа посредством web-технологий [7]. Поскольку разрабатываемая ЭС предназначена для обучения или поддержки принятия решений пользователем посредством web, эксперты и пользователи могут находиться на значительном расстоянии друг от друга. В связи с этим, впервые предложено реализовать двухуровневое управление данными БД и БЗ. Первый уровень представлен подсистемой «Редактор БЗ CLIPS». Редактор используется экспертом и инженером по знаниям для формирования БЗ в виде фреймовых шаблонов элементов языка CLIPS [17]. Второй уровень представлен подсистемой «Обозреватель БЗ CLIPS». С помощью этой подсистемы шаблоны БЗ активируются данными, вводимыми пользователем, являющимися специфичными для конкретной задачи. Обе эти подсистемы и составляют интеллектуальный web-интерфейс с пользователем, реализованный с помощью языка серверных сценариев php. Функции подсистемы объяснений выполняет подсистема «Обозреватель БЗ CLIPS».

Подсистема интерфейса с пакетами прикладных программ. В языке CLIPS предусмотрены средства процедурного программирования, аналогичные C и Pascal. Данные средства представляют собой пользовательские функции, написанные на языке C. Использование пользовательских функций для реализации интерфейса с ППП накладывает существенные ограничения на гибридную экспертную систему – при добавлении нового ППП требуется компилировать систему CLIPS заново. Такой подход затрудняет создание ЭС в сети Интернет. Другим подходом к реализации интерфейса является создание внешней программы-демона CLIPS. В этом случае все аналитические функции для реализации интерфейса выполняются программой-демоном на объектно-ориентированном языке программирования ООЯП, а пользовательские функции отвечают за обмен информацией между CLIPS и демоном. Демон реализован в качестве многопоточного приложения на платформонезависимом языке Java и позволяет обслуживать запросы от удаленных ЭС с использованием сокетов [20]. В качестве протокола обмена данными служит язык XML. Для реализации запуска ППП, написанных под DOS, используется виртуальная машина DosBox. Применение языка Java позволяет расширять функционал, не прибегая к перекомпиляции системы CLIPS.

Методы управления программным обеспечением. Перейдем к анализу методов управления программным обеспечением. В ходе анализа все взаимодействия представляются в виде событий. Существует два класса методов управления программным обеспечением: методы внешнего управления и методы внутреннего управления.

Известны три метода внешнего управления: последовательное управление процедурами; последовательное управление событиями; параллельное асинхронное управление. При последовательном управлении процедурами в каждый момент времени действует одна из процедур; это наиболее легко реализуемый способ управления. При последовательном управлении событиями управлением занимается монитор (диспетчер). При параллельном асинхронном управлении этим заведует несколько управляющих объектов (мониторов). Разрабатываемая нами оболочка для создания ЭС имеет интерактивный интерфейс и, следовательно, является системой, управляемой внешними воздействиями.

Построение гибридной ЭС как web-приложения предполагает использование параллельных процессов для обслуживания запросов, поступающих от удаленных пользователей.

Компонентами гибридной ЭС являются:

- «Обозреватель БЗ CLIPS» – позволяет просматривать и редактировать БЗ.
- «Редактор БЗ CLIPS» – позволяет создавать и редактировать экспертные системы, факты, правила, классы и т. д.
- БЗ – текстовый файл в формате CLIPS, предназначенный для хранения фактов, правил, классов и др. элементов языка.
- БД – предназначена для хранения информации из БЗ в структурированном виде.
- «Машина логического вывода CLIPS» – выполняет поиск решения.
- Демон «CLIPS» – подключает внешние прикладные программные продукты для реализации аналитических вычислений [20].
- Web-сервер – реализует механизмы взаимодействия между «Обозревателем БЗ CLIPS», «Редактором БЗ CLIPS» и клиентским приложением.
- Клиентское приложение – обеспечивает взаимодействие пользователя с гибридной экспертной системой (web-браузер).
- Внешняя программа для выполнения аналитических вычислений.

Данные компоненты представляют трехуровневую архитектуру гибридной ЭС (рис. 5).

Источником заявок служит пользователь. Заявки поступают по протоколу HTTP в очередь на web-сервер, который на основе информации об авторизации пользователя принимает решение, какому компоненту отправить заявку. Если пользователь не является экспертом по знаниям, то его заявка попадает в Обозреватель БЗ CLIPS. Обозреватель БЗ CLIPS обрабатывает запрос. Если пользователю необходим запуск решателя, то в системе формируется новая заявка и отправляется в машину вывода CLIPS.

Если в процессе поиска решения необходим запуск внешней программы, то CLIPS формирует новую заявку, которая попадает в очередь заявок Демона CLIPS. Если ресурс свободен, то заявка покидает очередь, происходит обработка заявки и запускается внешняя программа. После ее завершения полученные данные обрабатываются Демоном CLIPS и передаются в машину выводов CLIPS, продолжается поиск решения. Когда решение найдено, полученные в результате поиска данные отправляются в Обозреватель БЗ CLIPS, который формирует web-страницу для отображения пользователю. Если запуск решателя не выполняется, то происходит извлечение или запись данных в БЗ, физически расположенную на сервере БД. После этого, Обозреватель БЗ CLIPS формирует web-страницу, которая выдается пользователю посредством web-сервера.

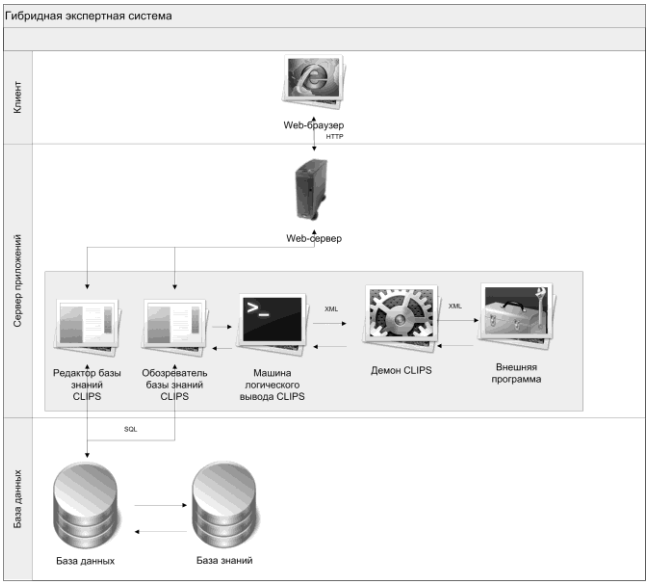


Рис. 5. Трехуровневая архитектура гибридной экспертной системы

Результаты и обсуждение

Предложенный методический подход к созданию гибридных экспертных систем как web-приложений испытали при разработке «быстрого прототипа» ЭС по выбору модели матричной коррекции в РФА. Концепция «быстрого прототипа» заключается в том, что создается не экспертная система, а ее прототип, который должен решать типичные задачи и требовать на свою разработку незначительное время [7]. Этот прототип на стадии тестирования подтвердил пригодность методов разработки ЭС для данной области знаний.

Поскольку тестируемая модель БЗ не привязана к онтологии конкретной предметной области, можно ожидать, что подход применим для широкого круга задач создания гибридных ЭС, предназначенных для использования в сети Интернет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молчанова Е. И., Смагунова А. Н., Прекина И. М. Программная оболочка для проведения РФА на аналитическом комплексе СРМ-25-IBM // Аналитика и контроль. – 1999. – № 2. – С. 38–43.
2. Молчанова Е. И., Носков С. И., Китов Б. И. Проектирование и создание экспертной системы для описания процессов взаимодействия рентгеновского излучения с веществом // Компьютерное моделирование 2005 : тр. VI Междунар. науч.-техн конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – С. 310–314.
3. Частиков А. П., Гаврилова Т. А., Белов Д. Л. Разработка экспертных систем. Среда CLIPS. – СПб. : БХВ – Петербург, 2003. – 608 с.
4. Рыбина Г. В., Демидов Д. В. Методы построения средств вывода для интегрированных экспертных систем // Интеллектуальные системы и технологии : науч. сессия МИФИ. – 2006. – Т. 3. – С. 1–5.
5. Джексон П. Введение в экспертные системы. – М. : Вильямс, 2001. – 624 с.
6. Litman D., Patel-Schneider P. F., Mishra A., Crawford J., Dvorak D. R++: Adding Path-based rules to C++ // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, – 2002. – Vol. 14, No.3.– P. 638–658.
7. Джарратано Д., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование, 4-е изд. : пер. с англ. – М. : Вильямс, 2007. – 1152 с.
8. Рыбина Г. В., Душкин Р. В., Демидов Д. В. Модели и методы обработки недостоверных знаний в инструментальном комплексе АТ-ТЕХНОЛОГИЯ // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. тр. – М. : Физматлит, 2003. – С. 401–407.
9. Рыбина Г. В. Задачно-ориентированная методология автоматизированного построения интегрированных экспертных систем для статических проблемных областей // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1997. – № 5. – С. 129-137.
10. Рыбина Г. В. Инструментальные средства нового поколения для построения прикладных интеллектуальных систем // Авиакосмическое приборостроение. – 2004. – № 10. – С. 14–23.
11. Спецификация функциональных требований к ИС [Электронный ресурс]. – URL : http://www.intuit.ru/department/se/devis/6/1.html. (дата обращения 09.11.2010)
12. Сидорова Е. А. Методы и программные средства для анализа документов на основе модели предметной области : дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2006 – 125 с.
13. Массель А. Г. Интеллектуальная поддержка принятия решений в исследованиях и обеспечение энергетической безопасности России и ее регионов : дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2011. – 130 с.
14. Подкаменный Д. В. Методика и инструментальные средства анализа и реинжиниринга унаследованного программного обеспечения в области энергетики : дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2011. – 125 с.
15. Осама Ель Сайед Ахмед Мохамед Шета. Методика и инструментальные средства построения хранилища данных и знаний для поддержки исследований в энергетике : дис. … канд. техн. наук. – Иркутск, 2010. – 137 с.
16. Передеряев И. И. Разработка моделей и средств информационной поддержки процессов подготовки и аттестации научных кадров : дисс… канд. техн. наук. – М., 2007. – 134 с.
17. Федоров В. В., Молчанова Е. И. Редактор базы знаний для создания экспертных систем в среде CLIPS. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008 – Вып. 3. – С. 76–79.
18. Минский М. Фреймы для представления знаний. – М., 1979. – 152 с.
19. Введение в базы данных [Электронный ресурс] – URL : www.mstu.edu.ru/study/materialz/zelenkov. (дата обращения 25.03.2011).
20. Щербаков И. В., Молчанова Е. И. Разработка объектно-ориентированного расширения языка среды разработки экспертных систем CLIPS // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образование 2010 : сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практич. конф., 20–27 дек. – Одесса : Черноморье, 2010. – Т. 4 : Технические науки. – С. 3–12.

УДК 621.336

Яковлев Дмитрий Александрович,
канд. техн. наук, доцент, декан ФПК Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), (3022) 24-04-03, e-mail: yakovlev@zab.megalink.ru.
Осипова Валерия Эдуардовна,
ассистент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), (3022) 24-04-03, e-mail: etif@zab.megalink.ru.
Дурнов Виталий Геннадьевич,
ассистент кафедры «Электроснабжение» Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала Иркутского государственного университета путей сообщения (ЗабИЖТ ИрГУПС), e-mail: durnov-vitalya@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ

D.A. Yakovlev, V.E. Osipova, V.G. Durnov

APPLICATION OF SYSTEM OF INDISTINCT MANAGEMENT OF ENTERPRISE POWER SUPPLY

Аннотация. *В статье затрагивается вопрос эффективности применения системы нечеткого управления энергообеспечением предприятия на примере Забайкальской дирекции тепловодоснабжения. Предложен и разработан алгоритм модели управления энергообеспечением предприятия на основе системы нечетких выводов.*

Ключевые слова: *нечеткая логика, нечеткое управление, система нечеткого вывода, управление энергообеспечением.*

Abstract. *This article concerns the question of efficiency of application of system of indistinct management of enterprise power supply on example of the Zabaikalskaya board of directors, enterprise providing with warm and water. The algorithm of model of management of power supply of the enterprise on the basis of system of indistinct conclusions is offered and developed.*

Keywords: *indistinct logic, indistinct management, system of an indistinct conclusion, management of power supply.*

Наличие неопределенностей или нечеткой информации, которая не может быть интерпретирована в вероятностных терминах, приводит к тому, что традиционные методы управления производственными процессами на основе компьютерных технологий являются недостаточно адекватными. В результате чего в последнее время широко используются интеллектуальные системы управления [1], к которым относятся системы нечеткого управления, или «fuzzy control» – нечеткое (неясное, размытое) управление.

Нечеткое управление предназначено для формализации человеческих способностей к неточным или приближенным рассуждениям, которые позволяют более адекватно описать ситуацию с неопределенностью. Основу нечеткого управления составляет нечеткая логика, суть которой состоит в использовании нечетких понятий и знаний, проведении операций с использованием нечетких логических правил и в получении на их основе нечетких выводов, на базе которых формируются алгоритмы управления.

Процесс нечеткого вывода представляет собой некоторую процедуру или алгоритм получения нечетких заключений на основе нечетких условий или предпосылок с использованием понятий нечеткой логики.

Одним из ключевых моментов состояния нечеткой модели является выбор переменных для нечеткого разделения, который осуществляется при помощи двух критериев выборки:

1) наличие явной корреляции с выходной переменной;

2) различные тенденции проявления такой корреляции в областях больших и малых значений изучаемой переменной.

Оценка возможностей модели проводится по двум критериям: точность определения состояния объекта и частота появления больших ошибок в оценке состояния объекта.

На основе анализа существующих моделей нечеткого управления промышленными предпри-

ятиями [3] составим алгоритм модели управления (рис. 1).

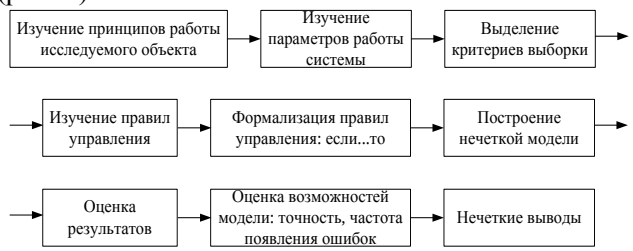


Рис. 1. Алгоритм написания модели управления предприятием на основе нечеткой логики

Представленный алгоритм содержит несколько этапов написания модели управления на основе нечеткой логики. Основополагающим этапом написания любой модели является изучение принципов и параметров работы системы.

В качестве исследуемого объекта рассмотрим систему энергообеспечения Забайкальской дирекции тепловодоснабжения (ЗабДТВ). Показателями работы исследуемой системы являются данные о суточных температурных режимах и наличии (запасах) топлива, полученные в ЗабДТВ за период с ноября 2010 г. по февраль 2011 г.

Анализ исходных данных показал, что к параметрам обеспечения работы энергосистемы относятся: температура воздуха, температура подачи и обратного возврата, расход воды, используемая мощность котлов и расход угля. Для выявления наиболее значимых из них определим коэффициент корреляции, воспользовавшись программным комплексом Statistica. Результаты расчета представлены графически на рис. 2.

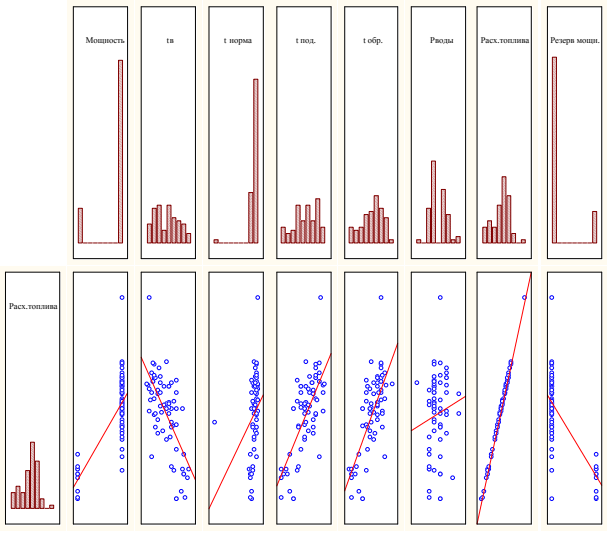


Рис. 2. Графики корреляционной зависимости рассматриваемых параметров системы от расхода топлива

Полученные результаты расчета позволяют сделать вывод о том, что наиболее значимыми параметрами рассматриваемой системы являются температура окружающего воздуха, температура подачи, мощность и расход топлива, взаимосвязанные между собой, коэффициент корреляции которых находится в пределах от 0,54 до 0,95. Задачей составления модели управления на основе нечеткой логики является определение величины потребления энергоресурсов для обеспечения работы энергосистемы. В связи с этим определим, что W, кВт·ч, tв, ^{o}C и tп, ^{o}C являются входными параметрами системы, а $P_{топл.}$, т – выходной параметр. Для выявления динамики потребления топлива $P_{топл.} = f$ (W, tв, tп) определим ошибочные и аномальные данные, для этого графически представим зависимость расхода топлива от требуемой температуры нагрева и линейный тренд оптимальных значений расхода (рис. 3).

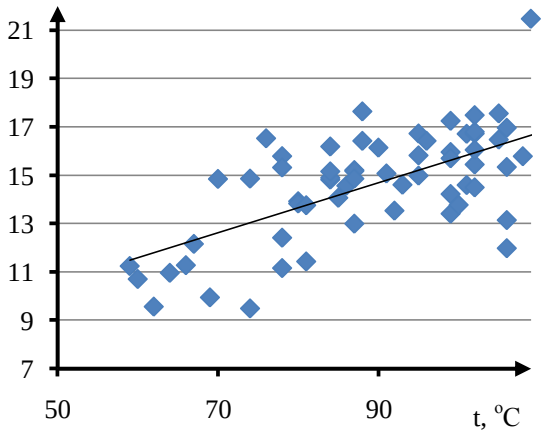


Рис. 3. Динамика зависимости расхода топлива от требуемой температуры нагрева

Зависимость расхода топлива от требуемой температуры нагрева носит линейный характер, при этом для одной и той же температуры нагрева воздуха в разное время используется разное количество топлива, что объясняется его качеством: при низком качестве расход его больше, даже при небольшой температуре нагрева.

Учитывая полученные значения линейного тренда, определим, что для температуры нагрева 52 ^{o}C оптимальный расход топлива составляет 11,231 т, таким образом, формально можно представить качество топлива как низкое, среднее и высокое. Рассматриваемые критерии входных параметров используются для составления модели управления на основе нечеткой логики.

Процесс нечеткого управления основан на формализации правил управления: если… то. Создание процесса осуществляется при помощи пакета Fuzzy Logic Toolbox, предназначенного для

нечеткого моделирования [4], и программного комплекса Matlab, путем разработки системы нечетких выводов, которая осуществляется в двух режимах: в интерактивном и режиме командной строки.

Создание системы нечеткого вывода в интерактивном режиме основывается на использовании редактора систем нечеткого вывода FIS, позволяющего задать форму функции принадлежности каждого параметра системы нечеткого вывода, создать правила системы нечеткого вывода в графическом режиме, а также визуализировать результаты, для получения значения выходных переменных в зависимости от исходных данных входных переменных.

Формализация процесса разработки системы нечеткого вывода в режиме команд осуществляется на основе алгоритма, представленного на рис. 4.

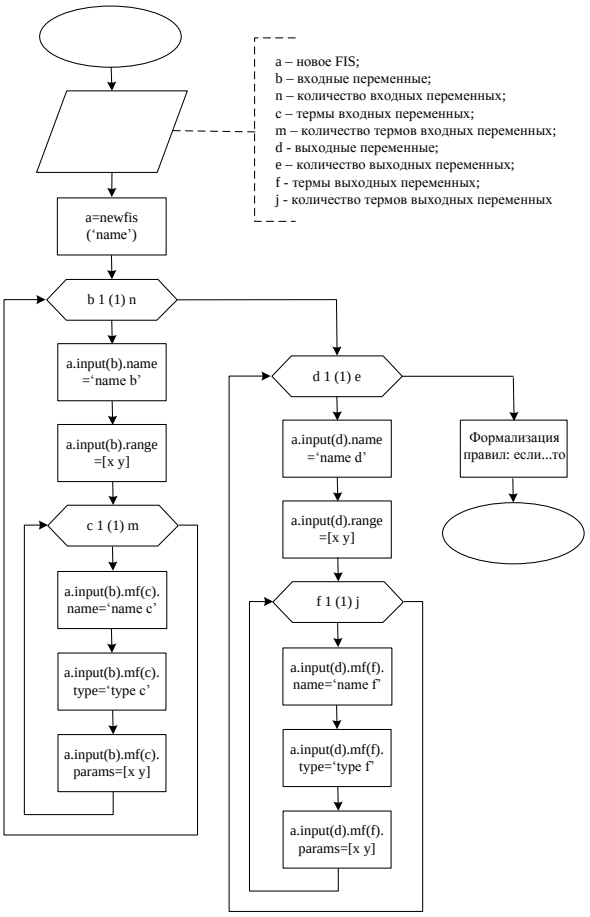


Рис. 4. Процесс разработки системы нечеткого вывода в режиме команд

В качестве входных параметров системы нечеткого вывода рассматриваются три нечеткие лингвистические переменные: «температура воздуха», «температура подачи» и «качество топлива», а в качестве выходных параметров – нечеткая лингвистическая переменная «расход топлива». Графическое представление разработанной модели изображено на рис. 5.

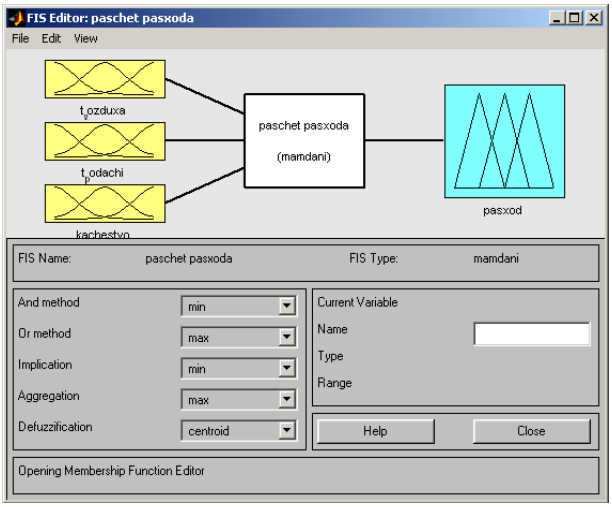


Рис. 5. Графическое представление модели управления на основе нечеткой логики

Каждая из входных и выходных переменных имеет определенное число термов, указывающих на их критические значения. В качестве терм-множества первой лингвистической переменной «температура воздуха» используем множество T_1 = {«T^Bmin», «T^Bmax»}, в качестве терм-множества второй лингвистической переменной «температура подачи» – множество T_2 = {«$T^П$max», «$T^П$min»}, а в качестве терм-множества третьей переменной «качество топлива» – множество T_3 ={«К низкое», «К высокое»}, в качестве терм-множества выходной лингвистической переменной «расход топлива» используется множество T_4 = {«низкий», «средний», «высокий»}. Критические значения каждого из термов находятся в определенных числовых диапазонах, представляющих собой матрицу.

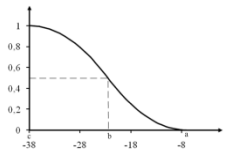
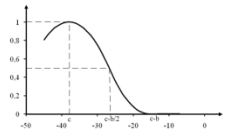
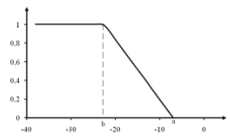
$$T = \begin{bmatrix} T^B_{\min} & T^B_{\max} \\ T^П_{\max} & T^П_{\min} \\ K_H & K_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\min} & P_{sr} & P_{\max} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -38 & -7 \\ 70 & 52 \\ 0 & 10 \end{bmatrix} = [7\ 15\ 23].$$

Для каждого терма входных и выходных переменных определим тип функции принадлежности для его представления, с помощью которого будет определяться степень принадлежности любого элемента рассматриваемого диапазона к нечеткому множеству [4]. Выбор типа функции принадлежности определяется таким образом, чтобы имелась возможность аналитического представления нечеткого множества в виде некоторой простой математической функции. В таблице 1 представлены значения и графики некоторых из них,

построенных для критических параметров $T_1 = [T^B_{\min}; T^B_{\max}] \Leftrightarrow [-7; -38]$

Таблица 1

Данные по функциям принадлежности

Тип	Форма определения	Графическое представление
s	$s(x;a,b,c)\begin{cases} 0 \text{ для } x \le a, \\ 2\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 \text{ для } a \le x \le b, \\ 1-2\left(\frac{x-c}{c-a}\right)^2 \text{ для } b \le x \le c, \\ 1 \text{ для } x \ge c \end{cases}$	
π	$\pi(x;b,c) = \begin{cases} s\left(x;c-b,c-\frac{b}{2},c\right) \\ \text{для } x \le c, \\ 1-s\left(x;c,c+\frac{b}{2},c+b\right) \\ \text{для } x \ge c. \end{cases}$	
γ	$\gamma(x;a,b) = \begin{cases} 0 \text{ для } x \le a, \\ \frac{x-a}{b-a} \text{ для } a \le x \le b, \\ 1 \text{ для } x \ge b. \end{cases}$	
t	$t(x;a,b,c) = \begin{cases} 0 \text{ для } x \le a, \\ \frac{x-a}{b-a} \text{ для } a \le x \le b, \\ \frac{c-x}{c-b} \text{ для } b \le x \le c, \\ 0 \text{ для } x \ge c. \end{cases}$	

Изменение параметров представляется следующим образом:

$$P = \left\{ \begin{array}{l} T^B \in \left[\begin{array}{l} T^B_{\min} \to T^B_{\max} \\ T^B_{\min} \leftarrow T^B_{\max} \end{array} \right], \\ T^{\Pi} \in \left[\begin{array}{l} T^{\Pi}_{\max} \to T^{\Pi}_{\min} \\ T^{\Pi}_{\max} \leftarrow T^{\Pi}_{\min} \end{array} \right], \\ K \in \left[\begin{array}{l} K_H \to K_B \\ K_H \leftarrow K_B \end{array} \right]. \end{array} \right\}$$

Таким образом, для всех входных переменных путем фаззификации определим тип функции принадлежности термов класса s. Термы выходной переменной T_4 определим через треугольный тип функции принадлежности класса t, причем вершины первого и третьего терма треугольников будут соответствовать минимальному и максимальному расходу топлива. Графическое представление функций принадлежности рассматриваемых параметров системы изображено на рис. 6.

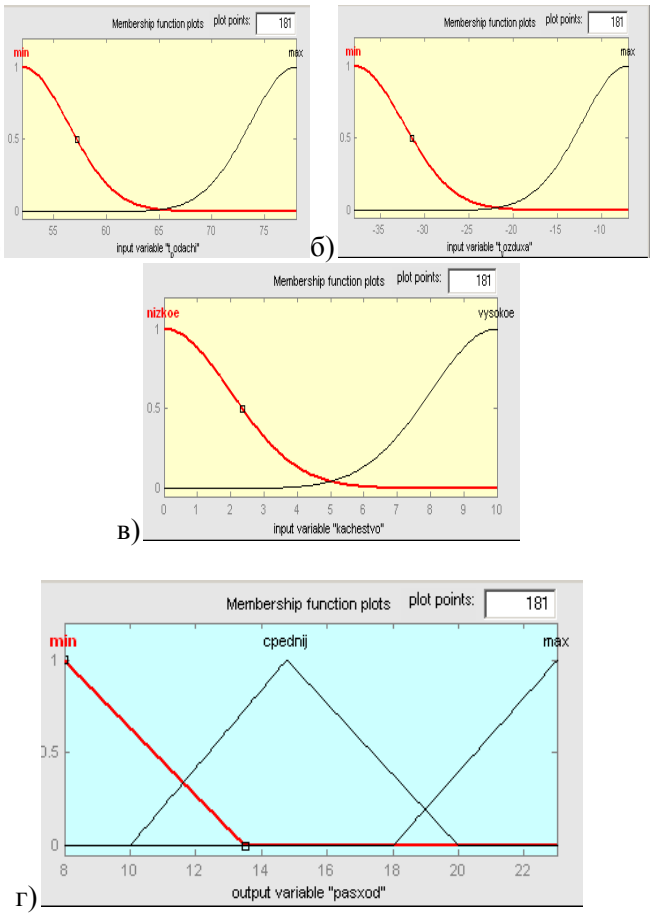


Рис. 6. Графическое представление функций принадлежности рассматриваемых параметров системы (графики а, б, в – входные переменные системы; график г – выходная переменная)

С учетом заданных нечетких множеств определим базу правил эвристического алгоритма управления расходом топлива при различных значениях входных параметров, которая примет вид:

$$(R_i)_{i=1}^{10} = \left\{ \begin{array}{l} R_1 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\min}\ или\ \mathrm{T}^{\Pi} = T^{\Pi}_{\max}\ или\ K = K_H, \\ \quad то\ P_{топл} = P_{\max}; \\ R_2 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\max}\ или\ \mathrm{T}^{\Pi} = T^{\Pi}_{\min}\ или\ K = K_B, \\ \quad то\ P_{топл} = P_{\min}; \\ R_3 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\min}\ и\ K = K_H, то\ P_{топл} = P_{\max}; \\ R_4 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\max}\ и\ K = K_H, то\ P_{топл} = P_{sr}; \\ R_5 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\min}\ и\ K = K_B, то\ P_{топл} = P_{sr}; \\ R_6 : если\ \mathrm{T^B} = T^B_{\max}\ и\ K = K_B, то\ P_{топл} = P_{\min}; \\ R_7 : если\ \mathrm{T^{\Pi}} = T^{\Pi}_{\max}\ и\ K = K_H, то\ P_{топл} = P_{\min}; \\ R_8 : если\ \mathrm{T^{\Pi}} = T^{\Pi}_{\min}\ и\ K = K_B, то\ P_{топл} = P_{\min}; \\ R_9 : если\ \mathrm{T^{\Pi}} = T^{\Pi}_{\max}\ и\ K = K_B, то\ P_{топл} = P_{sr}; \\ R_{10} : если\ \mathrm{T^{\Pi}} = T^{\Pi}_{\min}\ и\ K = K_H, то\ P_{топл} = P_{sr}. \end{array} \right.$$

Алгоритм формирования нечеткой базы правил представлен на рис. 7.

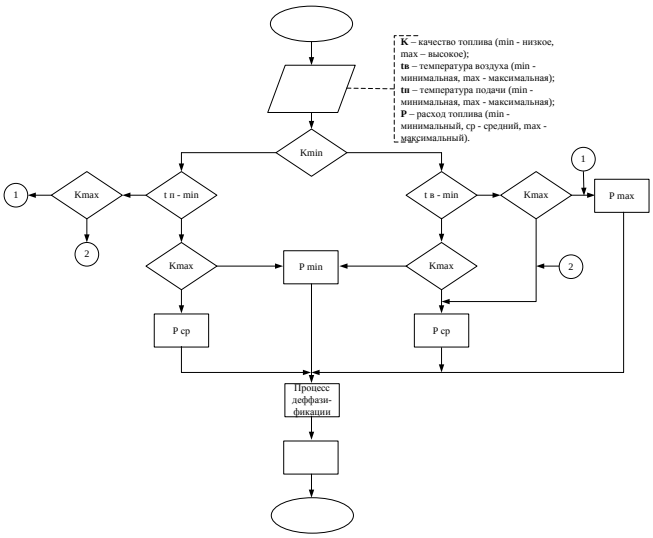


Рис. 7. Алгоритм формирования нечеткой базы правил

Графическое представление результатов нечеткого вывода изображено на рис. 8.

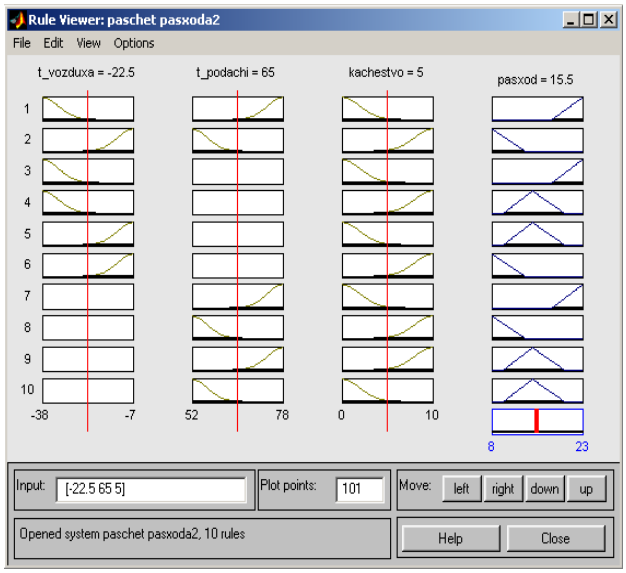


Рис. 8. Результат процесса нечетких выводов

На основании полученных правил, задавая значения входных и выходных параметров, путем дефаззификации получаем значение необходимого количества топлива (рис. 8). Например:

$$T = \begin{bmatrix} T^{B} \\ T^{\Pi} \\ K \end{bmatrix} = \left[P_{топл.}\right] \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -15 \\ 72{,}5 \\ 6{,}33 \end{bmatrix} = [16{,}1].$$

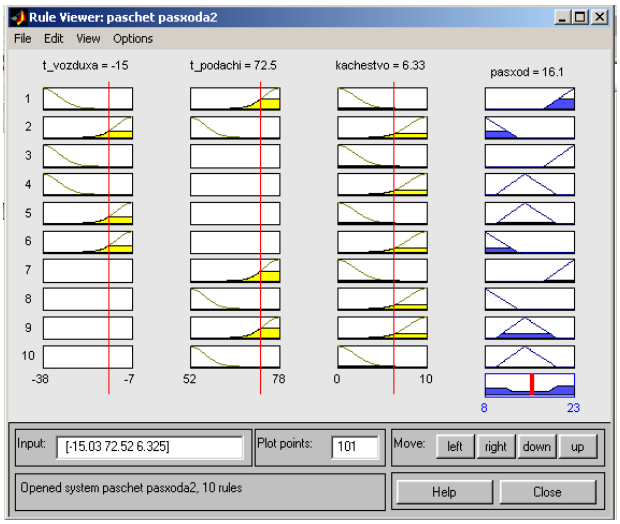


Рис. 9. Результат получения необходимого количества топлива в зависимости от заданных параметров

Таким образом, создается процесс разработки системы нечеткого вывода в интерактивном режиме. Для более детальной обработки и получения более точных результатов воспользуемся процессом управления на основе нечеткой логики, разработанным в режиме командной строки (рис. 10), структура которого представлена на рис. 11.

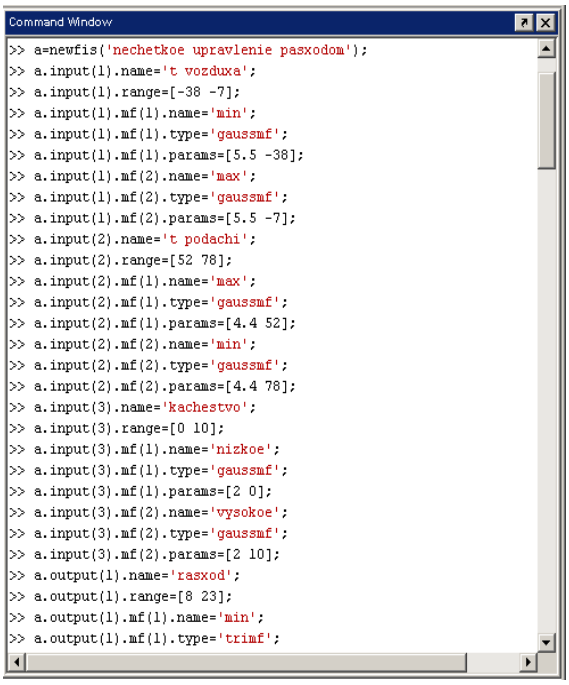


Рис. 10. Программа разработки процесса нечеткого управления в режиме командной строки

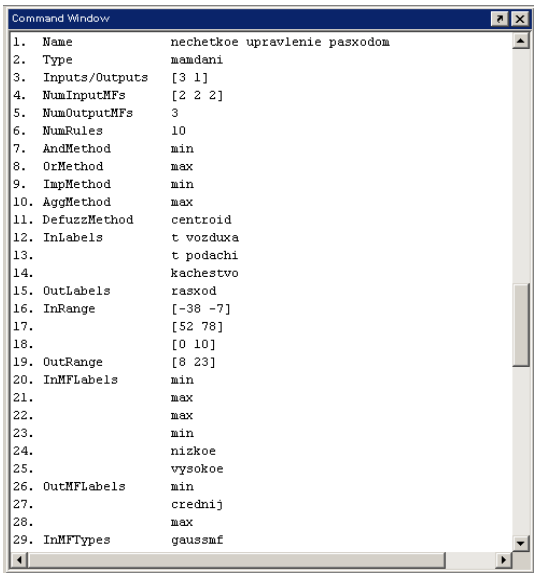


Рис. 11. Структура процесса нечеткого управления в режиме командной строки

Анализ полученных результатов показал, что разработанный процесс управления на основе нечеткой логики в режиме командной строки позволяет получить более точные результаты. Реальное значение выходного параметра для заданных значений входных нечетких переменных составляет 11,23 т. Следовательно, погрешность расчетов составляет 2,94 %.

Для окончательного анализа результатов разработанной нечеткой модели рассмотрим полученную поверхность нечеткого вывода, представленную на рис. 12.

Полученная поверхность результатов нечеткого вывода, по самым значимым параметрам – T_2 и T_3, служит для анализа адекватности нечеткой модели, позволяя оценить влияние изменения значений входных переменных на значение выходной нечеткой переменной.

Выводы

1. Разработан алгоритм написания модели управления на основе нечеткой логики применительно к системе энергообеспечения Забайкальской дирекции тепловодоснабжения.

2. Определены наиболее значимые параметры, влияющие на объект исследования.

3. Разработана модель управления на основе системы нечетких выводов. Результаты отклонения полученных результатов от фактических величин находятся в пределах в 2–3 %.

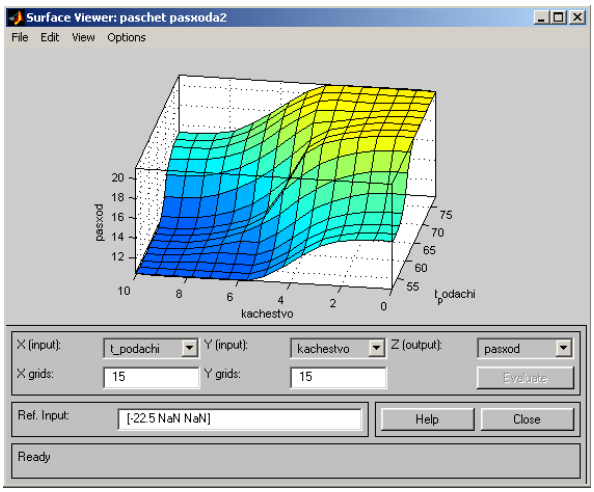


Рис. 12. Поверхности нечеткого вывода для разработанной нечеткой модели

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деменков Н. П. Нечеткое управление в технических системах : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 200 с.
2. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzy TECH – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
3. Асаи К. Прикладные нечеткие системы : пер. с япон. / ред. Т. Тэрано. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
4. Рудковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы : пер. с пол. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

УДК 535

Иванов Максим Сергеевич,
аспирант; ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и инженерная защита окружающей среды», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ИрГУПС, e-mail: vanov.maks@mail.ru; тел. 8-924-376-80-34

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ III ПОРЯДКА НА ПОСТРОЕНИЕ ГЕРМАНИЕВОЙ ЛИНЗОЙ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

M.S. Ivanov

COMPUTER SIMULATION OF THE SPHERICAL ABERRATION OF THE III ORDER TO BUILD THE FOCUSED INFRARED RADIATION WITH A GERMANIUM LENS

Аннотация. *В данной статье с помощью компьютерного моделирования проведён анализ влияния продольной сферической аберрации на фокусировку инфракрасного излучения германиевой линзы. Представленная математическая модель даёт возможность на примере известных методов оценить величину аберрации германиевой линзы известной геометрии. Показано, что для повышения точности фокусировки теплового излучения необходимо создание метода, позволяющего экспериментально определять продольную сферическую аберрацию в инфракрасной области спектра.*

Ключевые слова: *продольная сферическая аберрация, германиевая линза, инфракрасное излучение.*

Abstract. *In this paper, using computer simulation analysis of the influence of the longitudinal spherical aberration on the focusing of infrared germanium lenses is carried out. The given mathematical model provides an example of known methods to estimate the aberration of germanium lenses of known geometry. It is shown that to improve the accuracy of focusing the thermal radiation it is necessary to create a method allowing to experimentally determine the longitudinal spherical aberration in the infrared spectrum.*

Keywords: *longitudinal spherical aberration, germanium lenses, infrared radiation.*

Введение

В последние годы широкое применение находят оптико-электронные системы на основе полупроводниковых приемников излучения и оптико-механического сканирования. Эти системы применяются в качестве теплопеленгаторов, предназначенных для обнаружения различных объектов по их тепловому излучению при наведении на них датчика приёма теплового сигнала. В связи с бурным развитием полупроводниковых приёмников излучения их чувствительность многократно возросла, а инерционность стала существенно ниже. Это дало возможность использовать подобные оптико-электронные системы не только для обнаружения объектов, но даже для их опознавания [1]. В настоящее время системы теплопеленгаторов широко применяются как в военной технике, так и в промышленности, медицине, научных исследованиях и т. п.

Тепловое изображение в теплопеленгаторных приложениях получается следующим образом. Реальная оптическая система собирает инфракрасное излучение (ИК-излучение), осуществляя тем самым спектральную фильтрацию, фокусирует его на чувствительный элемент приемника, далее оптический сигнал преобразуется в соответствующий электрический сигнал, который затем усиливается и обрабатывается. Материалом линз, используемых для фокусировки ИК-излучения в оптике теплопеленгаторов, как правило, служит германий – германиевая линза (Ge-линза), пропускающая ИК-излучение в диапазоне от 2 до 15 мкм. Благодаря своему показателю преломления Ge-линза является очень полезным компонентом ИК-систем построения изображения, работающих в двух «атмосферных окнах» от 2–5 и 8–12 мкм [2].

Реальная оптическая система обладает аберрациями различного рода, отцентрированная же содержит только сферическую аберрацию. В теплопеленгаторах, используемых на железнодорож-

ном транспорте, в конструкции детекторов напольной сигнализации используется болометр полупроводникового типа с Ge-линзой сферической формы (см. рис. 1, где R – радиус сферической поверхности линзы, l – геометрический размер толщины линзы, d – толщина сферической части линзы на оптической оси, D – диаметр линзы, n – показатель преломления линза, F – фокус на оси, точка фокусировки лучей, несущих информацию о тепловом излучении (место крепления чувствительного элемента болометра типа БП-1 и БП-2М, размером $0{,}12 \times 0{,}12$ мм)).

Как и любой компонент сферической формы, линза не лишена сферической аберрации III порядка. Исследование данного вида аберраций Ge-линзы представляет актуальную задачу для анализа возможности уменьшения искажения ИК-сигнала при построении изображения в тепловых ИК приложениях.

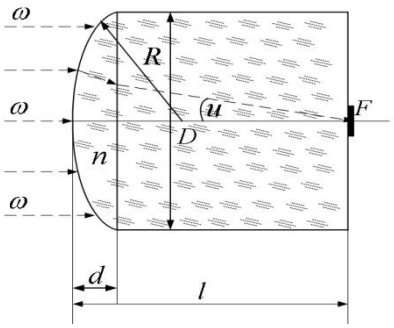


Рис. 1. Выпукло-плоская Ge-линза

Современные методы, такие как метод Гартмана, метод теневой картинки, интерферометрический метод и др., позволяют сделать оценку величины сферической аберрации оптических линз, применяемых в видимой области спектра; в ИК-области спектра экспериментальное определение величины сферической аберрации данными методами невозможно.

Таким образом, представляет практический интерес анализ математической модели влияния сферической аберрации, а также оценка ошибки результата построения фокусируемого ИК-излучения в Ge-линзе одним из вышеприведённых методов.

Для последующего сравнения этого результата с результатом расчёта величины сферической аберрации, предлагаемого в работах [3, 4] нелинейно-оптического метода, позволяющего определять величину продольной сферической аберрации экспериментально, путём АП-конверсии частоты ИК-излучения в нелинейном кристалле.

Теоретическая модель

Рассмотрим случай, когда выпуклая поверхность (поверхность второго порядка) разделяет две среды с показателями преломления n_1 и n_2 (рис. 2). Луч, идущий параллельно оптической оси, падает на поверхность в точку М. Найдем формулу продольной сферической аберрации δs^* для этого луча в зависимости от параметров системы и угла u наклона преломленного луча к оптической оси, соблюдая принятое в геометрической оптике правило знаков.

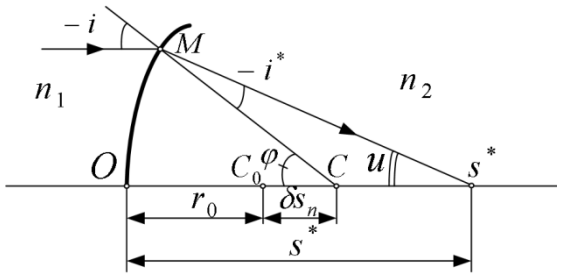


Рис. 2. К выводу формулы продольной сферической аберрации для выпуклой преломляющей поверхности

Пользуясь законом преломления и геометрическими соотношениями (рис. 2), найдем

$$s^* = r_0 + \delta s_n - MC\frac{\sin i^*}{\sin u}, \qquad (1)$$

где r_0 – радиус кривизны при вершине выпуклой поверхности; δs_n – продольная аберрация нормали МС, она определяется по формуле [5]:

$$\delta s_n = \frac{r_0 e^2}{e^2 - 1}\left[\frac{1}{\sqrt{1-\left(e^2-1\right)tg^2\varphi}} - 1\right]. \qquad (2)$$

Длину же нормали МС можно определить как

$$MC = \frac{r_0}{\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}}, \qquad (3)$$

где e – эксцентриситет поверхности второго порядка; φ – угол наклона нормали к оптической оси.

Так как $u = \varphi - i^*$ и $\sin i^* = \left(\sin i^*\right)/n = -\left(\sin\varphi\right)/n$, то

$$\frac{\sin i^*}{\sin u} = \frac{\cos\varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{1 - n^2}, \qquad (4)$$

где $n = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления двух сред.

Подставляя (2), (3) и (4) в (1), получим

$$s^* = r_0\left[1 - \frac{\cos\varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{\left(1-n^2\right)\sqrt{1 - e^2\sin^2\varphi}} + \frac{e^2}{e^2-1}\left(\frac{\cos\varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} - 1\right)\right]. \qquad (5)$$

В параксиальной области когда $\varphi \to 0$, тогда формула (5) примет известный в геометрической оптике вид

$$s_0^* = \frac{r_0 n}{n-1}. \qquad (6)$$

Найдем зависимость угла φ от u в виде явной функции. Так как

$$\sin u = \sin\varphi \cos i^* + \cos\varphi \sin i^*, \qquad (7)$$

то с учетом выражения

$$\cos i^* = \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{n}$$

уравнение (7) можно привести к виду

$$\left[\left(n^2-1\right)^2 + 4n^2\sin^2 u\right]\sin^4\phi -$$

$$-2n^2\left(n^2+1\right)\sin^2 u\sin^2\phi + \left(n\sin u\right)^4 = 0.$$

Решая это уравнение относительно $\sin^2\varphi$, получим

$$\sin\varphi = \pm\frac{n\sin u}{\sqrt{n^2+1-2n\cos u}}. \qquad (8)$$

Знак плюс соответствует случаю, когда $n>1$; при $n<1$ следует брать знак минус. Таким образом, основные тригонометрические функции угла φ в зависимости от u примут вид

$$\left.\begin{aligned} &\sin\varphi = \pm nQ\sin u;\\ &\cos\varphi = \pm Q\left(n\cos u - 1\right);\\ &tg\varphi = \pm\frac{n\sin u}{n\cos u - 1}, \end{aligned}\right\}, \qquad (9)$$

где $Q = \sqrt{n^2+1-2n\cos u}$.

Используя зависимости (5), (6) и (9), найдем продольную сферическую аберрацию $\delta s^* = s^* - s_0^*$ для луча, преломлённого под углом u к оптической оси:

$$\delta s^* = r_0\left[\frac{1}{1-n} - \frac{e^2}{e^2-1} \pm \right.$$

$$\left. \pm\frac{ne^2\cos u - 1}{\left(e^2-1\right)\sqrt{1+n^2-2n\cos u - \left(en\sin u\right)^2}}\right]. \qquad (10)$$

Полученная формула справедлива для всех видов преломляющих поверхностей второго порядка. Знак минус следует брать при $n<1$, плюс при $n>1$.

В некоторых случаях более удобно пользоваться формулой

$$\delta s^* = r_0\left[\frac{m}{m-1} - \frac{e^2}{e^2-1} \pm \right.$$

$$\left. \pm\frac{e^2\cos u - m}{\left(e^2-1\right)\sqrt{1+m^2-2m\cos u - \left(e\sin u\right)^2}}\right], \qquad (11)$$

где $m = 1/n$.

Последнюю формулу можно преобразовать так, чтобы в качестве аргумента использовать только одну тригонометрическую функцию. Введем обозначения:

$$\alpha = \sin^2\frac{u}{2};\ A = \frac{r_0\left(e^2-m\right)}{\left(e^2-2\right)\left(m-1\right)};\ a = \frac{2e^2}{e^2-m};$$

$$b = \frac{4\left(e^2-m\right)}{\left(m-1\right)^2};\ c = \frac{4e^2}{\left(m-1\right)^2},$$

с учетом, которых формула (11) примет вид

$$\delta s^* = A\left[1 - \frac{1-a\alpha}{\sqrt{1-b\alpha+c\alpha^2}}\right]. \qquad (12)$$

Для приближенных вычислений можно пользоваться формулой

$$\delta s^* \approx \frac{2r_0\left(m^2-e^2\right)}{\left(m-1\right)^3}\sin^2\frac{u}{2}. \qquad (13)$$

Если предметная точка расположена на конечном расстоянии от вершины выпуклой поверхности второго порядка, то получить в явном виде точную зависимость $\delta s^* = f(u)$ практически невозможно. В этом случае необходим тригонометрический расчет хода лучей, а для приближенных вычислений – использование известных формул теории аберраций III порядка [6, 7].

Выпуклые поверхности второго порядка находят применение в оптических приборах различного назначения. Наиболее часто их используют в широкоугольных окулярах в качестве линзы с выпуклыми параболическими поверхностями. Такие выпуклые линзы используют в микрообъективах, предназначенных для работы за пределами видимой области спектра. В промышленности на железнодорожном транспорте находят большое применение линзы, имеющие сферическую, чаще параболическую или гиперболическую поверхности, в качестве оптики фокусирующей ИК-излучение на чувствительный элемент теплопеленгатора [8].

Рассмотрим на примере известного метода автоколлимационного контроля выпукло-плоских линз применение теоретической модели, анализируя формулы (10–11), (13) (рис. 3), когда после преломления на плоской поверхности излучение отражается от сферической поверхности Ge-линзы и затем идёт параллельно оси. Этот же ход лучей,

но в обратном направлении, возникает при падении пучка лучей со стороны плоской поверхности линзы. Важно оценить величину погрешности сферической поверхности линзы δs^* и проанализировать влияние параметров геометрии линзы на построение изображения после прохождения ИК-излучения через неё.

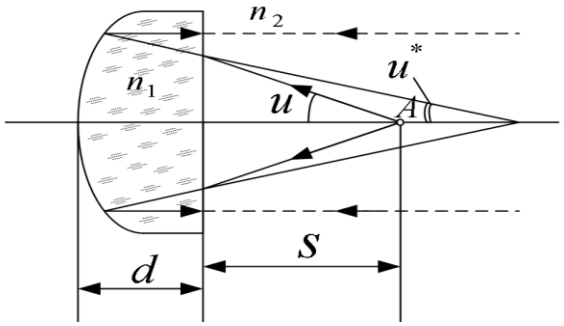


Рис. 3. Схема контроля выпукло-плоской сферической линзы при автоколлимационном отражении от плоской поверхности

Продольную сферическую аберрацию δs^* луча, преломленного на плоской поверхности, можно вычислить по приближенной формуле

$$\delta s^* \approx \frac{ns}{2}\left[\left(n^2-1\right)u^{*2}+\frac{3}{4}\left(n^2-1\right)u^{*4}\right]. \qquad (14)$$

При падении параллельного пучка лучей на отражающую сферическую поверхность второго порядка возникает аберрация, которую можно вычислить по формуле

$$\delta s^* \approx \frac{r_0}{16}\left(e^2-1\right)u^{*2}+\frac{3r_0}{256}\left(e^2-1\right)\left(3e^2-1\right)u^{*4}, \qquad (15)$$

где r_0 – вершинный радиус кривизны поверхности линзы; e – ее эксцентриситет. Легко заметить, что по аналогии с выводом формул (10), (13) продольной сферической аберрации, здесь $u=\varphi$, а $u^*=u$.

В итоге, если не учитывать отражающий эффект на сферической поверхности линзы, полагая, что излучение проходит параллельно оптической оси линзы через её выпуклую поверхность, данные формулы сводятся к формулам (10) и (11), а также к (13) для расчёта величины аберрации приближенного значения.

Компьютерное моделирование

Компьютерное моделирование проводилось с учётом математического аппарата контроля автоколлимационного отражения от плоской поверхности. В программной среде Delphi 7, а также в программном пакете CODE V9.5 были получены результаты расчётов величины продольной сферической аберрации III порядка для выпукло-плоской линзы, которая используется в качестве основного оптического элемента болометра БП-1. Изготовлена линза из германия с показателем преломления n=4,05, геометрия которой следующая: эксцентриситет поверхности e = 3,24, радиус кривизны при вершине r_0=10 мм и толщина линзы на оптической оси d = 2,87 мм.

Зависимость поперечной сферической аберрации δs^* от угла u наклона преломленного луча к оптической оси получила вид кривой, представленной на рис. 4, величина аберрации имеет весьма существенные значения при u = 0,192 рад., а при 0,202 рад. она увеличивается практически в 5 раз, по отношению к 0,192 рад., принимая при этом весьма существенные значения.

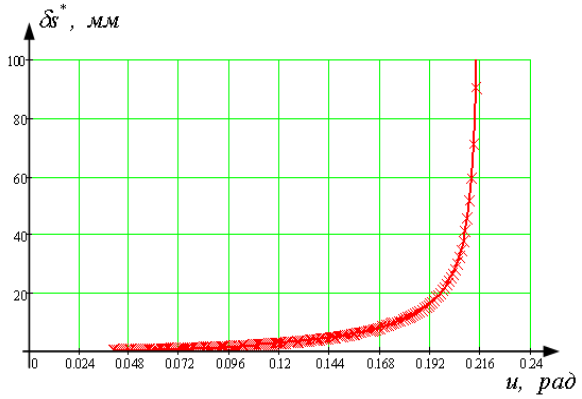


Рис. 4. График зависимости δs^* от угла u

Угол наклона преломленных к оптической оси лучей напрямую зависит от диаметра D входного зрачка Ge-линзы. Делаем вывод, что чем больше диаметр зрачка, тем больше угол u, а значит и величина продольной сферической аберрации.

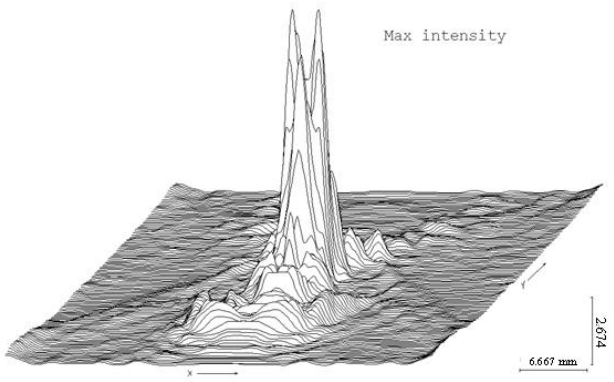


Рис. 5. Распределение интенсивности сфокусированного Ge-линзой излучения

Интенсивность в Ge-линзе данной геометрии распределена по всему входному зрачку неравномерно, это видно на рис. 5, где чётко выражен максимум интенсивности сходящихся пара-

ксиальных лучей, значение которого соответствует мнимому геометрическому размеру толщины линзы l^* = 14,241 мм. Действительное же значение геометрического размера толщины линзы l =13,333 мм.

Данный результат получен для длин волн в интервале от 2 до 6 мкм, отсюда можно сделать вывод, что для большего интервала, например от 2 до 12 мкм, величина сферической аберрации δs^* может существенно коррелировать в ИК-области спектра, измеряемой полупроводниковым болометром, в котором и используется линза данной геометрии и свойств.

Заключение

По результатам компьютерного моделирования и анализа полученных данных следует отметить, что информативное ИК-излучение, несущее тепловой сигнал, сходится далеко за фактическим положением чувствительного элемента полупроводникового болометра БП-1 и БП-2М.

Методы контроля сферических поверхностей, контроля аберраций III и большего порядков, математический аппарат которых был использован для построения компьютерной модели в данной работе, применимы исключительно для теоретического расчёта величины сферической аберрации, а также её анализа в ИК-области спектра. Для экспериментального же исследования и расчёта актуальной ошибки измерения следует принять во внимание, что визуальное наблюдение аберрационной картины сфокусированного линзой излучения невозможно, так как она находится в ИК-области спектра, невидимой человеческому глазу.

Автор выражает благодарность д. ф.-м. н., профессору, зав. кафедрой «Физика» Иркутского государственного университета путей сообщения - Анатолию Ильичу Илларионову за инициирование данной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Henini M., Razeghi M. Handbook of Infrared Detection Technologies. Elsevier Science Ltd, 2002. P. 509.
2. Ллойд Дж.. Системы тепловидения / пер. Н.В.Васильченко под ред. канд. техн. наук А.И.Горячева. М.: Мир, 1978. 416 с.
3. Илларионов А.И., Янчук О.В. Влияние сферической аберрации волнового фронта основного излучения на процессы генерации второй гармоники в одноосных кристаллах // IX Международная школа – семинар по люминесценции и лазерной физике: сб. науч. тр. / под ред. акад. С.Н. Багаева, акад. Н.А. Борисевича и проф. Е.Ф. Мартыновича. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. – С. 212-218.
4. Иванов М.С., Илларионов А.И., Горева О.В. Нелинейно-оптический метод измерения величины сферической аберрации германиевых линз в инфракрасной области спектра // Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2010»: сб. науч. тр. / под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова - Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. – С. 157-158.
5. Зверев В.А., Кривопустова Е.В. Оптотехника несферических поверхностей: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 203 с.
6. Смирнов А.П. Аналитический метод аберрационного расчёта оптических систем. // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 102, № 1. С. 142-148.
7. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике: Расчет, изготовление и контроль. - 4-е изд., испр. и доп. – М.: Книжный дом ЛИБРОКОМ, 2011. 296 с.
8. Слюсарев Г.Г. Методы расчёта оптических систем. – Л.: Машиностроение, 1969. – 671 с.

УДК 622.235.622.274

Тюпин Владимир Николаевич,
д-р техн. наук, профессор, ЗабИЖТ, ИрГУПС
тел. 89144408282, e-mail: bzhd@zab.megalink.ru
Святецкий Виктор Станиславович,
генеральный директор ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение»
тел. 8-30-245-2-51-10

ПОВЫШЕНИЕ ВЫХОДА ЗАДАННОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА УРАНОВОЙ РУДЫ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В СЛОЕВЫХ ЗАХОДКАХ

V.N. Tyupin, V.S. Svyatetsky

CAPACITY RAISING OF MACHINERY RATES OF URANIUM ORE BULK IN CONDUCTING BLASTING IN BAND DELIVERY

Аннотация. *В статье обоснована необходимость уменьшения выхода фракций 40 мм для наиболее эффективной рентгенорадиометрической сортировки рудной массы. Дана методика расчета и рассчитаны параметры БВР при слоевой выемке в различных по взрываемости рудных массивах, с целью снижения выхода мелких фракций и получения заданного КИШ. Несоответствие (превышение) числа шпуровых зарядов на забой и удельного расхода ВВ степени взрываемости массива приводит к увеличению выхода фракции 40 мм в 1,2–1,5 раза. Дальнейшие исследования необходимо проводить в области совершенствования конструкции заряда ВВ и выбора типа ВВ.*

Ключевые слова: *слоевые заходки, рудная масса, машинные классы, взрывные работы, взрываемость.*

Abstract. *The article substantiates the necessity of cuts capacity reduction 40 mm for the more efficient radioactivity assortment of ore bulk. The design technique is given and boring blasting ratings during band excavating in different exploding grade ore massifs are analysed for the purpose of small cuts capacity reduction and receiving the given coefficient of blast hole efficiency. Discomformity or relative altitude of the number of blast hole charges on the stope back and unit consumption of explosives on the exploding grade of massif results in the raising of cuts capacity 40 mm by 1,2–1,5 times. It is necessary to conduct further researches in the field of developing the blasting charge structure and choice of the blasting explosive.*

Keywords: *band delivery, uranium ore bulk, machinery rates, blasting, exploding grade.*

Опыт работы рудников и рудоподготовительного комплекса ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО) показал, что гранулометрический состав взорванной рудной массы существенно влияет на себестоимость обогащения урановой руды. В работе [1] подробно рассмотрено влияние гранулометрического состава на себестоимость при различных технологических схемах рудосортировки. Сюда относятся: схемы с применением радиометрических и рентгенорадиометрических методов в процессе очистных работ с разделением руды на сорта; забойное радиометрическое опробование руд с селективной выемкой рудных тел; применение рудничных аналитических радиометров для экспрессного опробования в различных транспортных емкостях с крупнопорциональным обогащением руды; применение метода автоматической радиометрической сортировки руд с использованием различных сепараторов. Технико-экономический анализ показал [1], что наиболее эффектно рентгенорадиометрическое обогащение (РРС).

Метод обогащения РРС заключается в следующем. Товарная руда в результате рудосортировки на автомобильном рентгено-сортировочном комплексе разделяется на богатую часть, подаваемую в шихту гидрометаллургии, и бедную руду, поступающую на мокрое грохочение, которая в процессе рассева разделяется на три класса, из которых класс +40 мм подвергается рентгенорадиометрическому обогащению. Класс (40–10) мм дробится до крупности (10–5) мм и отгружается в штабели кучного выщелачивания, мелкие классы (менее 5 мм) и шламы включаются в шихту гидрометаллургического завода.

Для оснащения обогатительного комплекса ОАО «ППГХО», необходимы рентгенорадиометрические сепараторы СРФ 4–150, имеющие техническую производительность 20 т/ч для сепарации руды с крупностью 150–40 мм.

Исследования показали, что фракция взорванной рудной массы размером менее 40 мм возникает в основном в трех случаях. В первом – это руды с высоким содержанием металла, которые приурочены к тектоническим швам и разломам. В районе разломов и швов происходит разупрочнение горного массива за счет ранних тектонических процессов, а гидротермальные растворы закиси-окиси урана способствуют дальнейшему разупрочнению естественных отдельностей там. Во втором случае мелкие фракции возникают вблизи взорванных зарядов ВВ в массиве с низким содержанием урана или безрудном массиве. Безрудный тонко измельченный материал попадает в отвалы кучного выщелачивания или шихту гидрометаллургического завода, что снижает технико-экономические показатели обогащения и переработки рудного сырья. В третьем случае переизмельчение происходит в результате разлета взорванной рудной массы и соударения ее с неподвижной стенкой врубовой полости или подвижной взорванной массой с противоположной стороны врубовой полости.

Задача настоящей работы заключается в минимизации выхода фракции менее 40 мм из безрудной части массива и забалансовых руд.

Изучение технической литературы на предмет получения заданной крупности дробления горного массива взрывом [2, 3, 4] показало, что в настоящее время известно 3 разновидности методик. Первая разновидность обеспечивает заданную степень дробления со снижением выхода негабарита на открытых горных работах [2, 3]. На открытых горных разработках обеспечение заданной степени дробления преследует цель снизить выход крупных фракций – негабарита, так как при его большом выходе снижается производительность экскавации, появляются дополнительные затраты на разделку негабарита накладными или шпуровыми зарядами ВВ.

Второй вид методик [4, 6] предназначен для получения заданной степени дробления горного массива взрывом при подэтажно-камерной и этажно-камерной системах подземной разработки, а также при подготовке массива к подземному выщелачиванию. Они направлены также на снижение выхода негабарита.

Третий вид методик расчета параметров буровзрывных работ используется при проходке выработок [2, 5]. Целью методик является обеспечение заданного коэффициента использования шпура (КИШ) и снижение степени удароопасности горного массива.

Выход мелких фракций (штыб) при добыче угля на шахтах существенно влиял на эффективность его добычи. Коэффициент крепости угля равен f = 2–4. Буровзрывные работы на угольных шахтах применялись до 60–70-х годов XX века. Однако опасность взрыва угольной пыли или воспламенения метана в шахтах перенаправила научные исследования и производство на создание очистных механических комплексов для добычи угля. Исследования по снижению выхода мелких фракций (штыба) угля при ведении взрывных работ ограничились снижением работоспособности взрывчатого вещества (ВВ). Однако такой подход не приемлем при проходке слоевых заходок в горных массивах Стрельцовского рудного поля, где в одном забое может находиться и ослабленный трещиноватый участок массива с f = 4–8, и практически монолитная порода с коэффициентом крепости до 16–20.

Таким образом, анализ литературных источников показал, что в области контроля и регулирования выхода мелких фракций при ведении взрывных работ в прочных горных породах научно-исследовательские работы практически непроводились.

Однако при использовании метода радиометрической сортировки (РРС) именно содержание и выход мелких фракций будет определять эффективность обогащения урановых руд.

Горно-геологические причины повышенного выхода мелких фракций безрудных и забалансовых рудных массивов горных пород заключаются прежде всего в прочности и степени трещиноватости массивов.

Трещиноватый горный массив месторождений, отрабатываемых ОАО «ППГХО», представлен большим разнообразием литологических разновидностей вмещающих пород – это в основном фельзиты, трахидациты, песчаники, конгломераты, гравелиты, граниты. Физико-технические свойства пород, влияющие на качество дробления массива взрывом, изменяются в широких пределах: коэффициент крепости по Протодьяконову – от 4 до 20, предел прочности на разрыв – от 5 до 15 МПа, скорость продольной волны – от 2500 до 5000 м/с, среднее расстояние между трещинами всех систем

от 0,05 до 1–2 м, число систем трещин – от 3 до 5, глубина разработки – от 200 до 700 м [6].

Размеры зоны переизмельчения зависят от физико-технических свойств массива и параметров детонации ВВ. Промышленными экспериментальными исследованиями на рудниках ОАО «ППГХО» установлено, что вокруг взорванных шпуровых зарядов ВВ в забое слоевой заходки образуется зона раздавливания диаметром $(1{,}2\div3{,}0)d_3$ (d_3 – диаметр заряда ВВ), зона радиальных трещин радиусом $(2{,}5\div15)\cdot d_3$, зона заколов радиусом $(10\div30)\cdot d_3$. Зона раздавливания и частично зона радиальных трещин обеспечивают выход фракций размером до 40 мм.

Замеры показали, что в настоящее время выход фракции 40 мм в слоевых заходках составляет: на руднике «Глубокий» (вмещающие породы граниты) 25–35 %, на руднике 1 (трахидациты) 35–50 %.

Одним из способов снижения выхода мелких фракций является определение необходимого количества шпуровых зарядов ВВ в соответствии с взрываемостью массива. Превышение числа шпуровых зарядов на забой заходки свыше необходимого приводит к увеличению выхода мелких фракций. Занижение числа шпуровых зарядов на забой приводит к уменьшению КИШ.

Для получения заданной степени дробления и достижения заданного КИШ ниже приводится методика, в формулах которой учитываются физико-технические свойства массива, его трещиноватость и параметры буровзрывных работ.

Общее количество шпуров на забой определяется из геометрических соображений, характера действия взрываемого заряда ВВ при отбойке в слоевых заходках и равно

$$N = \frac{S}{S_B} = \frac{2S}{a_o^2}, \qquad (1)$$

где S – площадь сечения выработки; S_B – площадь воронки выброса от взрыва одного заряда ВВ; a_o – расстояние между шпурами.

Анализ паспортов БВР на рудниках ОАО «ППГХО» показал, что расстояние между врубовыми (при вертикально-клиновом врубе) отбойными, оконтуривающими шпурами, а также линия наименьшего сопротивления (ЛНС) примерно равны. Согласно энергетической теории [6], энергия взрыва расходуется на упруго-пластические деформации трещиноватого массива, разрушение и выброс горной массы. В этом случае расстояние между шпурами при слоевой отбойке можно определить по формуле

$$a_o = W = 2R_p, \qquad (2)$$

где W – линия наименьшего сопротивления; R_p – радиус зоны дробления от взрыва шпура, в пределах которой размер кусков не превышает заданного размера.

Теоретические исследования позволили установить R_p в виде

$$R_p = \frac{\sqrt{\pi}}{8}\frac{D\rho_в d_3 c\nu\left(1-\frac{\mu\nu}{1-\nu}\right)}{(\sigma_p+\mu P)(1-\nu)\Phi}\sqrt{\frac{d_к}{d_e}}, \qquad (3)$$

где $D, \rho_в, d_3$ – соответственно скорость детонации, плотность заряжания ВВ, диаметр заряда ВВ; c, ν, σ_p – скорость продольной волны, коэффициент Пуассона, предел прочности на разрыв образца горной породы; μ, d_e, Φ – коэффициент трения между отдельностями, размер отдельностей, показатель трещиноватости; $d_к, P$ – допустимый (заданный) размер куска, величина горного давления соответственно.

Зависимость (3) очень громоздкая, кроме того, из-за большой вариации показателей σ_p, c, ν, может появиться неточность в расчетах. Поэтому величину R_p можно упростить, подставляя туда постоянные параметры:

$$\pi = 3{,}14,\ (\sigma_p+\mu P)\approx 10^7(1+\mu),\ d_к = 0{,}3\ \text{м},$$
$$\mu = 0{,}4,\ \nu = 0{,}25.$$

Тогда

$$R_p = \frac{D\rho_в d_3 c\nu}{(1+\mu)(1-\nu)\Phi d_e}\cdot 10^{-8}. \qquad (4)$$

Проектный удельный расход ВВ для достижения заданного КИШ и обеспечения минимума выхода переизмельченных фракций определяем по формуле

$$q_п = Q_3 V^{-1} = \frac{d_3^2\rho_в}{a_o^2}, \qquad (5)$$

где Q_3, V – соответственно масса ВВ в шпуре, объем горной массы, отбитой одним шпуром.

Выход переизмельченных фракций 40 мм можно определить по очевидной формуле

$$V_м = \frac{\pi R_{рм}^2\cdot N}{S}\cdot 100\ \%, \qquad (6)$$

где $R_{рм}$ – радиус зоны переизмельчения, в пределах которой размер куска не превышает 40 мм.

$R_{рм}$ определяется по формуле (3), куда вместо $d_к$ подставляем $d_{км} = 0{,}04$ м.

Тогда

$$R_{рм} = 0{,}37\ R_p + 0{,}5\ d_3. \qquad (7)$$

Определим численные значения параметров, приведенных в методике на основе классификации массивов горных пород Стрельцовской группы месторождений по взрываемости [6]. Физико-технические свойства массивов приведены в табл. 1. Кроме того, применяем аммонал 200 с $D = 4{,}4 \cdot 10^3$ м/с; $\rho_В = 0{,}9 \cdot 10^3$ кг/м^3; $d_З = 0{,}04$ м; $d_{км} = 0{,}04$ м.

Расчеты показали (табл. 2), что выход фракции 40 мм составляет 25–28 %. Фактически эта величина больше на 10–15 %, что обусловлено кинетическим соударением отбрасываемой массы с неподвижной преградой или подвижной рудной массой.

Главное, что необходимо отметить, – при несоответствии числа шпуров на забой категории взрываемости выход мелких фракций может существенно увеличиваться. Например, при N = 30 в породах с d_e = 0,05 м, $V_м$ = 50 %, в породах с d_e = 0,15 м при N = 35 $V_м$ составит 40 %. Опытно-промышленная проверка предложенной методики и расчетных параметров БВР на рудниках «Глубокий» и № 1 ОАО «ППГХО» доказала их техническую и экономическую эффективность. Ожидаемый экономический эффект от внедрения новых паспортов БВР на рудниках ОАО «ППГХО» составил 180 млн руб. в год.

Поэтому при ведении буровзрывных работ в слоевых заходках необходимо выбирать число шпуров на забой в соответствии с взрываемостью рудных массивов, которая определяется естественной трещиноватостью. Помимо этого, из анализа формул (3, 4, 5) следует, что выходом фракции 40 мм можно управлять, создавая конструкцию заряда ВВ с дифференцированной плотностью заряжания, а также подбирать тип ВВ в соответствии с трещиноватостью (взрываемостью) рудного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оптимизация разработки сложноструктурных урановых месторождений / Авт. В.Г. Иванов, В.И. Култышев, В.Б. Колесаев, В.Г. Литвиненко, В.Г. Шелудченко, А.В. Тирский. – М.: Издательство «Горная книга». – 2007. – 265 с.
2. Справочник взрывника / Б.Н. Кутузов, В.М. Скоробогатов, И.Е. Ерофеев и др. Под общей ред. Б.Н. Кутузова. – М.: Недра. – 1988. – 511 с.
3. Кутузов Б.Н., Тюпин В.Н. Проектирование массового взрыва для достижения требуемой интенсивности дробления трещиноватого массива // Изв. ВУЗов. Горный журнал. – 1985. – №4. – С. 41–45.

Таблица 1

Физико-технические свойства рудных трещиноватых массивов горных пород Стрельцовской группы месторождений и радиусы зон дробления при взрыве

Категория взрываемости	d_e, м	$Ф$	μ	$\frac{cv}{1-v}$, 10^3, м/с	$R_р$, м	$R_{рм}$, м
I	<0,05	>12	<0,2	< 1,1	> 0,57	> 0,23
II	0,05–0,15	12–10	0,2–0,3	1,1–1,4	0,57–0,47	0,23–0,19
III	0,15–0,40	10–8	0,3–0,45	1,4–1,7	0,47–0,39	0,19–0,17
IV	0,40–1,0	8–6	0,45–0,6	1,7–2,0	0,39–0,35	0,17–0,15
V	>1,0	<6	>0,6	> 2,0	<0,35	<0,15

Таблица 2

Расчетные параметры БВР при слоевой выемке руд для снижения выхода мелких фракций при обеспечении заданного КИШ (площадь заходки S=10 м^2, длина шпура 1,8 м)

Категория взрываемости	d_e, м	$a_{о,}$ м	N	$q_п$, кг/м^3	$V_м$, %
I	< 0,05	> 1,14	< 16	< 1,1	< 26,5
II	0,05–0,15	1,14–0,94	16–22	1,1–1,6	26,5–24,9
III	0,15–0,40	0,94–0,80	22–30	1,6–2,2	24,9–27,3
IV	0,40–1,0	0,80–0,70	30–40	2,2–2,9	27,3–28,3
V	> 1,0	< 0,7	> 40	> 2,9	> 28,3

4. Тюпин В.Н. Методика расчета параметров БВР при подэтажно-камерной отбойке.//Техн. прогресс в атом. пром. – сер.: ГМП. – 1989. – Вып.7. – С. 3–5.
5. Тюпин В.Н. Рациональные параметры буровзрывных работ при проходе выработок в удароопасных массивах горных пород. // Горный журнал. – 1992. – №7. – С. 29–34.
6. Тюпин В.Н. Повышение эффективности геотехнологии с использованием энергии взрыва при деформировании трещиноватых напряженных массивов горных пород. – Диссерт. на соиск. уч. степени докт. техн. наук. – М.: ВНИПИПТ. – 2002. – 267 с.

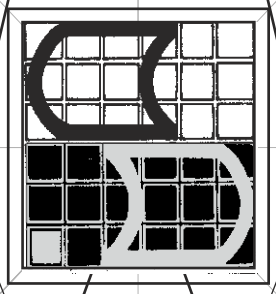
Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование



Раздел 3.

Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство

ОСНОВНЫМИ НАУЧНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ ЖУРНАЛА ЯВЛЯЮТСЯ:

- математика и механика;
- электроника, измерительная техника, радиотехника и связь;
- энергетика, электрификация и энергетическое машиностроение;
- машиностроение;
- строительство и архитектура;
- транспорт;
- управление, вычислительная техника и информатика;
- экономика и управление.

УДК 621.332

Сидоров Олег Алексеевич,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС, тел.: (3812) 31-34-46
Аркашев Александр Евгеньевич,
канд. техн. наук, преподаватель кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС, тел.: 8 (3812) 31-34-46, e-mail: arkaleks@yandex.ru
Ларькин Иван Валерьевич,
аспирант кафедры «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС, e-mail: ivan_larkin@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АВТОРЕГУЛИРУЕМОГО ТОКОПРИЕМНИКА С КОНТАКТНОЙ ПОДВЕСКОЙ

O.A. Sidorov, A.E. Arkashev, I.V. Larkin

SIMULATION OF ACTIVE CONTROL PANTOGRAPH AND CATENARY INTERACTION

Аннотация. *Рассмотрены принципы управления нажатием токоприемника электроподвижного состава (ЭПС). Предложена система автоматического регулирования (САР) нажатия токоприемника и разработана ее математическая модель. Выполнен анализ САР нажатия с различными типами регуляторов.*

Ключевые слова: *моделирование, токоприемник, регулирование, контактное нажатие.*

Abstract. *In this study, strategies of the pantograph force control are considered. The automatic control system (ACS) of pantograph force is offered and its mathematical model is developed. Also analysis of ACS with different types of controllers is given.*

Keywords: *simulation, pantograph, control, contact force.*

Первый этап реализации Стратегии развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 года предусматривает обновление подвижного состава с исключением парков с истекшим сроком службы, а также создание подвижного состава и инфраструктуры для высокоскоростного движения. Одним из путей достижения указанных целей является разработка и внедрение инновационных технологий, что связано с необходимостью прикладных и фундаментальных исследований в области железнодорожного транспорта.

В Омском государственном университете путей сообщения ведется работа по созданию магистрального токоприемника в рамках проекта «Разработка и организация высокотехнологичного производства нового магистрального токоприемника для применения на линиях с модернизированной инфраструктурой системы токосъема», реализуемого при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

Разрабатываемые токоприемники должны соответствовать требованиям, определяемым скоростью движения на участке, и обеспечивать соблюдение предусмотренных параметров и характеристик. При выборе зависящей от скорости средней величины нажатия в контакте необходимо стремиться, с одной стороны, к обеспечению бесперебойного токосъема, с другой – к уменьшению износа контактного провода и контактных вставок токоприемников [1].

Решение проблемы изменения статических сил нажатия заключено в применении активно регулируемых приводов в конструкциях токоприемников, управление которыми осуществляется по одному из следующих принципов: разомкнутый, замкнутый и комбинированный.

Разомкнутый принцип управления заключается в компенсации повторяющихся по пролетам опор контактной сети волнообразных изменений контактного нажатия по заданному закону.

Достоинствами системы с разомкнутым управлением являются простота реализации, высокая скорость реагирования системы на волнообразные изменения контактного нажатия и гарантированная устойчивость. Недостатками системы являются высокая чувствительность к изменению скорости и длине пролетов опор контактной сети, а также принципиальная невозможность получения высокой точности при неизвестных возмущениях.

При замкнутом принципе управления в обратной связи системы используется датчик, сигнал

с которого поступает на регулятор, выдающий управляющие воздействия для поддержания заданного значения контактного нажатия.

При такой схеме полная компенсация возмущающих воздействий невозможна, поскольку система управления начинает действовать на объект после того, как факт отклонения уже свершился. Одним из главных достоинств этого метода является работа элементов системы управления в условиях значительных изменений внешней среды, то есть в условиях большого числа случайных воздействий различного вида.

Для системы с обратной связью необходимо вычисление показателей устойчивости и качества регулирования, что позволяет выявлять возможности ее устойчивой работы и область применения.

Комбинированный принцип управления достигается объединением разомкнутого и замкнутого принципов и позволяет компенсировать волнообразные изменения контактного нажатия с помощью опережающего регулирующего воздействия, а случайные воздействия отслеживать при помощи обратной связи.

При замкнутом и комбинированном принципе управления применяются следующие типы регуляторов: позиционный, пропорциональный (П-регулятор), пропорционально-интегральный (ПИ-регулятор), пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-регулятор).

Управляющее воздействие от исполнительных устройств может быть приложено к рамам токоприемника, верхнему узлу либо быть комбинированным.

При действии на рамы токоприемника схема управления имеет следующие преимущества: нет жестких ограничений по размерам, массе и типу привода (пневматический, гидравлический, электрический). Однако его эффективность ограничена низким частотным диапазоном (до 1–2 Гц), относящимся к частоте изменения нажатия по пролетам опор контактной сети.

Схема управления нажатием в верхнем узле токоприемника более эффективна для управления в диапазоне частот до 20 Гц, но она налагает жесткие ограничения на размеры и массу привода.

Комбинированная схема управления нажатием отрабатывает низкочастотные колебания контактного нажатия с помощью устройств регулирования, расположенных в подъемно-опускающем механизме, а высокочастотные – с помощью устройств, расположенных в верхнем узле.

Выбор конкретного регулятора в совокупности с исполнительным устройством и параметрами токоприемника позволяет получить требуемый переходный процесс нажатия с определенными показателями качества и устойчивости.

Согласно техническому заданию на разрабатываемый токоприемник, одним из требований является его оснащение системой автоматического регулирования нажатия. На этапе выполнения технического проекта сотрудниками ОмГУПСа предложена система регулирования, в качестве чувствительных элементов которой выступают датчик скорости, датчик контактного нажатия и датчик искрения, а в качестве блока управления – регулятор, основанный на нечеткой логике (Fuzzy-регулятор) (рис. 1).

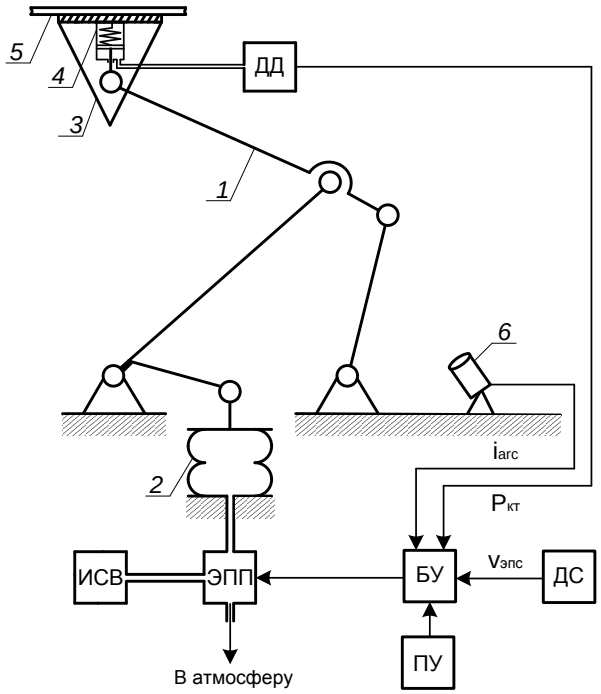


Рис. 1. Структурная схема САР нажатия токоприемника:
1 – рамы токоприемника; 2 – резинокордный элемент; 3 – полоз токоприемника; 4 – датчик нажатия; 5 – контактный провод; 6 – датчик искрения; ДД – датчик давления; ДС – датчик скорости; БУ – блок управления; ИСВ – источник сжатого воздуха; ПУ – пульт управления; ЭПП – электропневматический преобразователь

При подъеме токоприемника 1 сжатый воздух поступает через электропневматический преобразователь (ЭПП) в полость пневмопривода, выполненного в виде пневматического резинокордного элемента (РКЭ) 2. Полоз токоприемника 3 оснащен демпфирующими элементами 4, выполняющими одновременно функции датчика контактного нажатия. При взаимодействии токоприемника с контактным проводом 5 изменение контактного нажатия ведет к изменению давления воздуха в пневматической магистрали, связанной с датчиком давления (ДД). Блок управления (БУ) обрабатывает сигналы от датчика давления, датчика скорости (ДС) и датчика искрения 6 и фор-

мирует управляющее воздействие на электропневматический преобразователь в соответствии с заданным алгоритмом. Подъем и опускание токоприемника осуществляется через пульт управления (ПУ), установленный в кабине машиниста.

Моделирование токоприемника, оснащенного САР нажатия, осуществляется в приложении Simulink среды Matlab, являющемся мощным средством обработки многомерных данных [2]. Целью исследования является расчет системы регулирования нажатия и оценка влияния нескольких типов регуляторов на качество токосъема.

В предложенной модели взаимодействие токоприемника и контактной подвески реализовано в пакете физического моделирования Simmechanics приложения Simulink. Использование пакета Simmechanics позволяет создать механическую систему с использованием модели твердого тела, осуществить анализ трехмерных моделей и объединить механические блоки с другими типами блоков приложения Simulink. Механическая система «токоприемник – контактная подвеска» моделируется в виде отдельных тел, имеющих массовые и инерционные характеристики. Данные о геометрических параметрах тел извлекаются из xml-файлов, полученных при их моделировании в программном средстве трехмерного проектирования SolidWorks, что позволяет визуализировать исследуемый процесс и упростить его восприятие (рис. 2).

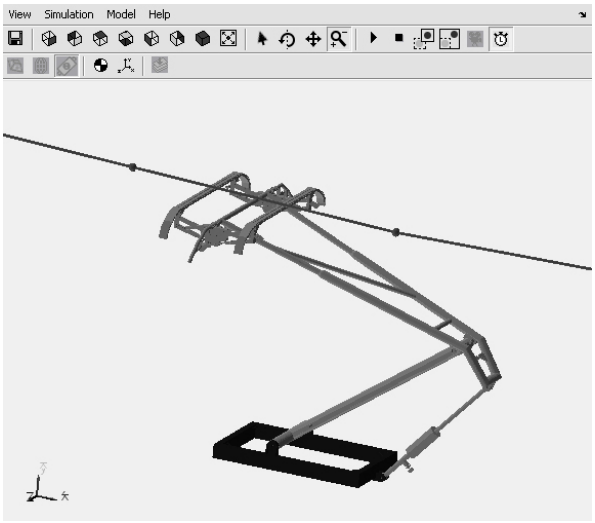


Рис. 2. Модель механической системы «токоприемник – контактная подвеска» в пакете Simmechanics

В процессе моделирования взаимодействия токоприемника с контактной подвеской был предложен и реализован алгоритм, описывающий контакт между полозами токоприемника и элементами контактного провода. Блок вычисления и реализации силы взаимодействия представлен в виде подсистемы из блоков Body Sensor и Body Actuator (рис. 3). Данные о перемещениях из подсистем «контактная сеть» и «токоприемник» через блоки Body Sensor передаются в подсистему вычисления контактного нажатия «ForceLaw», с выхода которой величина силы нажатия передается обратно в подсистемы посредством блоков Body Actuator.

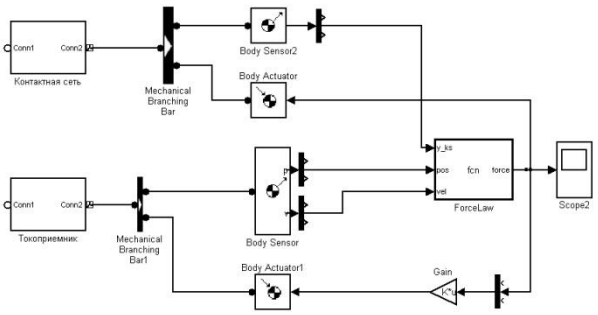


Рис. 3. Модель блока реализации контактного взаимодействия

Подсистема «ForceLaw» предназначена для вычисления нажатия токоприемника на контактный провод по следующему закону:

$$P_{kt} = \begin{cases} k \cdot y + b \cdot \dot{y}, & \text{если } y = y_n; \\ 0, & \text{если } y \neq y_n, \end{cases} \qquad (1)$$

где k – виртуальная жесткость, имитирующая контакт,

b – виртуальное демпфирование, имитирующее контакт,

$y, \dot{y}$ – перемещение и скорость точки контакта,

y_n – перемещение полоза токоприемника.

Использование выражения (1) позволяет учесть в модели отрывы полоза токоприемника от контактного провода.

Рис. 4 поясняет принцип расчета контактного нажатия между приведенной массой контактной сети и полозом токоприемника.

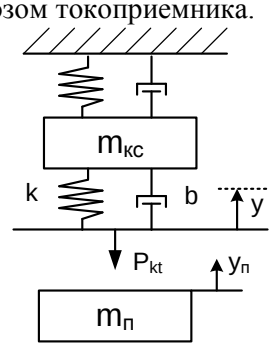


Рис. 4. Модель расчета контактного взаимодействия между контактной сетью и полозом токоприемника

При дальнейшем моделировании и исследовании САР нажатия в приложении Simulink описанная выше механическая система «токоприемник – контактная подвеска» представлена в виде одноименной подсистемы, как составной части САР нажатия. Колебания основания токоприемника учтены с помощью двухмассовой модели ЭПС и функции неровности железнодорожного пути.

Для анализа САР нажатия и оценки ее влияния на качество токосъема необходимо определить математические модели всех элементов системы.

Резинокордный элемент является колебательным звеном, основными параметрами которого являются коэффициент усиления $k_{РКЭ}$, постоянная времени $T_{РКЭ}$ и коэффициент демпфирования $\xi_{РКЭ}$:

$$W_{РКЭ}(p)=\frac{k_{РКЭ}}{T_{РКЭ}{}^2\cdot p^2+2\cdot\xi_{РКЭ}\cdot T_{РКЭ}\cdot p+1}. \quad (2)$$

Электропневматический преобразователь имеет линейную зависимость выходного давления от входного электрического сигнала с коэффициентом усиления $k_{ЭПП}$ и обратную связь по давлению воздуха.

Датчик нажатия, состоящий из демпфирующего элемента и преобразователя давления воздуха в электрический сигнал, является апериодическим звеном, имеющим коэффициент усиления $k_{ДН}$ и постоянную времени $T_{ДН}$:

$$W_{ДН}(p)=\frac{k_{ДН}}{T_{ДН}\cdot p+1}. \quad (3)$$

Датчик искрения принимается усилительным звеном с коэффициентом $k_{ДИ}$, а скорость движения ЭПС при моделировании задается постоянным либо равномерно увеличивающимся значением.

Основным этапом в процессе проектирования САР нажатия токоприемника является определение закона регулирования и выбор соответствующего регулятора.

На этапе выполнения технического проекта исследуется работа САР нажатия с тремя различными регуляторами: трехпозиционный регулятор, ПИД-регулятор и Fuzzy-регулятор. Модель САР нажатия в программе Matlab Simulink с указанными регуляторами представлена на рис. 5.

Трехпозиционный регулятор имеет следующую характеристику:

$$P_p=\begin{cases}P_{p\min}, & \text{при } P_{кт}>P_{кт\max};\\ 0, & \text{при } P_{кт\min}<P_{кт}<P_{кт\max};\\ P_{p\max}, & \text{при } P_{кт}<P_{кт\min}.\end{cases} \quad (4)$$

Передаточная функция ПИД–регулятора:

$$W_{PID}(p)=k_p+\frac{k_i}{p}+k_d\cdot p, \quad (5)$$

где k_p, k_i, k_d – соответственно пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие регулирования.

Fuzzy-регулятор, используемый в САР нажатия, имеет три входа: контактное нажатие, искрение токоприемника и скорость движения ЭПС и один выход – статическое нажатие токоприемника. Математическая модель регулятора, основанного на нечеткой логике, приведена в [3]. Моделирование САР нажатия токоприемника с Fuzzy-регулятором выполнено в пакете Fuzzy Logic Toolbox, входящем в состав системы Matlab.

Переходные характеристики h(t) САР нажатия с вышеуказанными регуляторами представлены на рис. 6, а основные показатели качества исследуемых систем приведены в табл. 1.

В результате оценки устойчивости САР на-

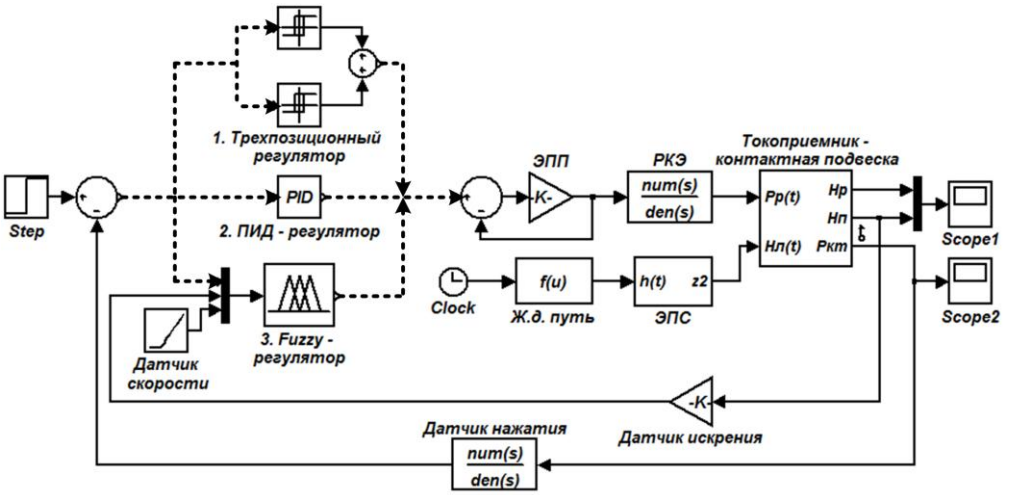


Рис. 5. Модель САР нажатия с различными регуляторами в Matlab Simulink

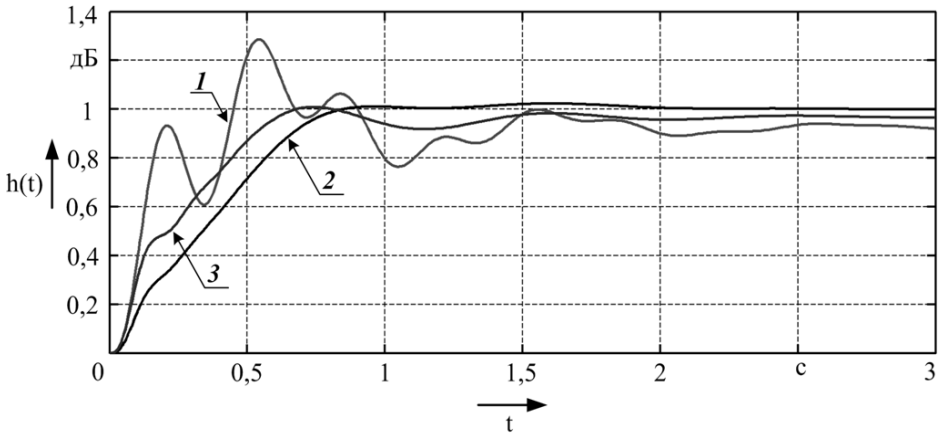


Рис. 6. Переходные процессы САР нажатия:
1 – с позиционным регулятором, 2 – с ПИД-регулятором, 3 – с Fuzzy-регулятором

Таблица 1

Показатели качества САР нажатия

Показатель	с трехпозиционным регулятором	с ПИД-регулятором	с Fuzzy-регулятором
Время регулирования, с	1,4	0,75	0,6
Перерегулирование, %	28	1	4
Статическая ошибка, %	7	0	3

жатия с исследуемыми регуляторами, которая проводилась по методу фазовых траекторий, сделан вывод об их устойчивости на всем диапазоне требуемых скоростей (0–200 км/ч).

Зависимость нажатия токоприемника без САР нажатия и оснащенного САР нажатия с исследуемыми регуляторами от скорости движения ЭПС представлена на рис. 7.

Токоприемник, не оснащенный САР нажатия (рис. 7 а), имеет зону резонанса при скорости

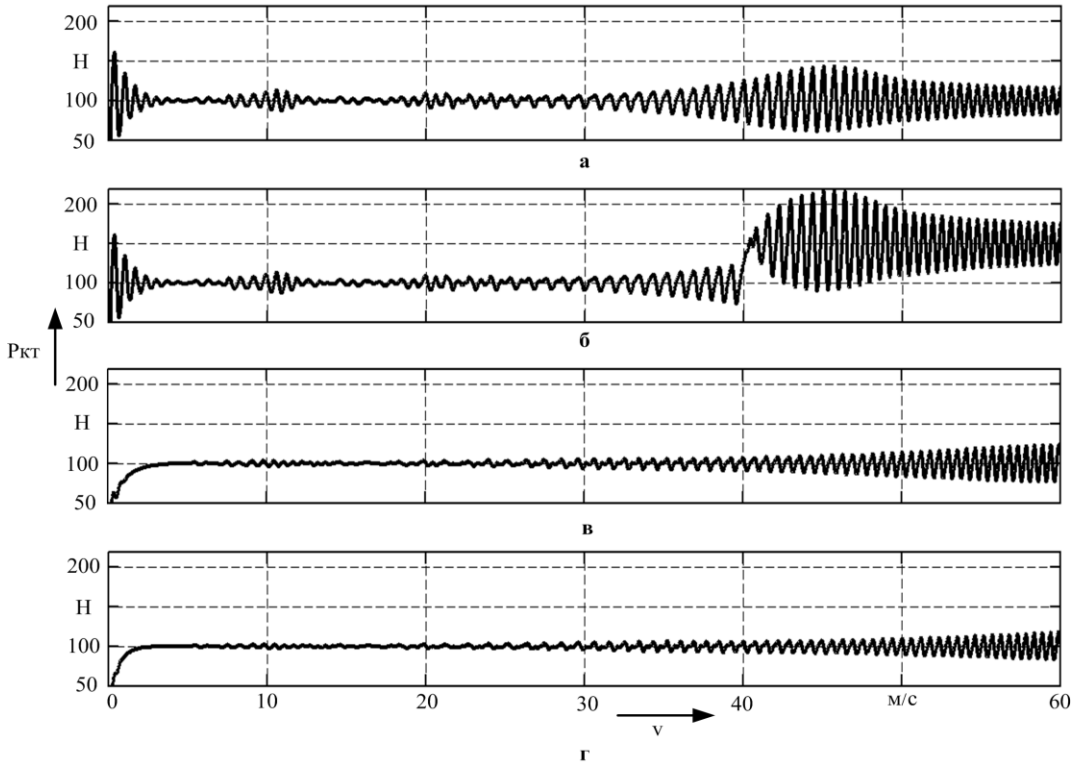


Рис. 7. Зависимость нажатия токоприемника от скорости движения ЭПС: а – без САР нажатия, б – при работе САР с позиционным регулятором, в – при работе САР с ПИД-регулятором, г – при работе САР с Fuzzy-регулятором

45 м/с.

Нажатие токоприемника с трехпозиционным регулятором (рис. 7 б) при удовлетворительном качестве токосъема совпадает с нажатием токоприемника без регулятора. Но при увеличении скорости движения ЭПС до 40 м/с либо увеличении среднеквадратичного отклонения контактного нажатия до определенного значения статическое нажатие переходит на повышенное значение.

При срабатывании позиционного регулятора среднеквадратичное отклонение нажатия увеличивается, но он позволяет избежать отрывов и интенсивного искрения токоприемника, являющихся наиболее опасным режимом токосъема. САР нажатия с позиционным регулятором имеет колебательный переходной процесс, характеризующийся большим временем регулирования, перерегулированием и высокой статической ошибкой регулирования (табл. 1).

ПИД-регулятор работает непрерывно и позволяет поддерживать контактное нажатие (рис. 7, *в*) на заданном уровне. При точной настройке ПИД-регулятор позволяет снизить СКО нажатия токоприемника на всем требуемом диапазоне скоростей, получить апериодический переходной процесс, обладает высоким быстродействием и точностью регулирования. Недостатком ПИД-регулятора является необходимость точной и квалифицированной настройки для каждой пары «токоприемник – контактная подвеска».

Fuzzy-регулятор по данным от датчика нажатия позволяет поддерживать контактное нажатие (рис. 7, *г*) на заданном уровне, а при появлении отрывов токоприемника и срабатывании датчика искрения переводит статическое нажатие на повышенное значение. Кроме того, в зависимости от скорости движения ЭПС Fuzzy-регулятор изменяет статическое нажатие токоприемника. Fuzzy-регулятор обеспечивает результат регулирования на уровне настроенного ПИД-регулятора, но его настройка основывается на базе правил, формируемых экспертами, что позволяет использовать его для любых типов пар «токоприемник – контактная подвеска».

Поскольку взаимодействие токоприемника с контактной подвеской является сложным динамическим процессом, в котором необходимо учитывать нелинейность элементов токоприемника, аэродинамическое воздействие и другие стохастические процессы, то применение методов управления на основе нечеткой логики является актуальным для управления нажатием токоприемника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сидоров О. А. Системы контактного токосъема с жестким токопроводом : моногр. – М. : Маршрут, 2006. – 119 с.
2. Щербаков В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде MATLAB и SIMULINK : учеб. пособие. – Омск : Сиб. автомобильно-дорожная академия, 2003. – 160 с.
3. Ларькин И. В., Сосновский С. Ю. Система регулирования нажатия токоприемника, основанная на нечеткой логике // Моделирование. Теория, методы и средства : материалы XI межд. науч.-практ. конф. – Новочеркасск : Южно-Рос. гос. техн. ун-т, 2011. – С. 83–85.

УДК 621.336

Раевский Николай Владимирович,
кафедра «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения в г. Чите
тел.: 8-924-473-67-76, e-mail: durnov-vitalya@mail.ru
Яковлев Дмитрий Александрович,
кафедра «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения в г. Чите
тел.: 8-924-473-67-76, e-mail: durnov-vitalya@mail.ru
Дурнов Виталий Геннадьевич,
кафедра «Электроснабжение», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения в г. Чите
тел.: 8-924-473-67-76, e-mail: durnov-vitalya@mail.ru

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МЕТОДИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

N.V. Raevsky, D.A. Yakovlev, V.G. Durnov

TIME SERIES FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION BY CHOOSING THE OPTIMAL METHOD

Аннотация. *На основе системного анализа решена задача по увеличению точности прогнозирования тягового электропотребления. Разработаны алгоритмы выбора оптимальной методики прогнозирования в зависимости от исходной информации. Предложен один из способов классификации методов прогнозирования временных рядов электропотребления. Рассмотренный подход к задачам прогноза тягового электропотребления в ОАО «РЖД» позволяет сократить издержки при покупке электрической энергии.*

Ключевые слова: *временной ряд электропотребления, метод прогнозирования, алгоритм.*

Abstract. *The problem of increasing the accuracy of train traction electricity consumption forecasting on the basis of systems analysis is considered. Algorithms for choosing the optimal forecasting techniques, based on initial information, were developed. A way of classifying the methods of time series forecasting of electricity consumption was suggested. The considered approach to the train traction electricity consumption forecasting in RZD allow reducing expenses on buying electricity.*

Keywords: *time series of power energy consumption, a method of forecasting, algorithm.*

Введение

Железнодорожный транспорт находится в числе основных потребителей электрической энергии (ЭЭ). Свыше 4,5 % потребляемой в стране электроэнергии идет на тягу поездов. Это составляет около 70 млрд кВт·час в год.

Организация планирования электропотребления (ЭП) железнодорожным транспортом производится с участием администратора торговой системы НП «АТС». При составлении заявок на рынке электроэнергии к потребителям повышаются требования к надежности и достоверности результатов планирования ЭП. Это требует решения сложной задачи выбора оптимальной методики прогнозирования в зависимости от исходных данных. Величина нормативного уровня отклонений прогнозного значения для покупателя устанавливается в размере 2 %, но приемлемым диапазоном для предприятия, не несущего существенных издержек, можно считать ± 5 % [1]. В этих условиях появляется возможность заключать договоры на приобретение энергоресурсов у поставщиков ЭЭ по льготным тарифам.

Классификация методов прогнозирования электропотребления

Бурное развитие прогностики как науки за последние десятки лет привело к созданию множества методов, процедур и приемов прогнозирования.

Первые работы, имеющие отношение к рассматриваемой теме, опубликованы в конце 70-х годов прошлого века. В истории развития и применения информационных технологий прослеживаются три периода. До 1990 г. в основном используются традиционные линейные методы прогноза временных рядов, основанные на регрессионном анализе. В 90-е годы широкое развитие получило использование нелинейных подходов при решении задач прогнозирования. Это позволило повысить точность получаемых результатов. Тре-

Рис. 1. Классификация методов прогнозирования

тий этап начался несколько лет назад, когда желание повысить точность и надежность прогнозов привело к появлению многочисленных комбинированных методов и схем. Корректность предсказаний в этом случае, зависит от взаимного дополнения двух или более методик разного уровня и класса.

Точность прогноза меняется в зависимости от того, на какой период упреждения выполняется прогноз. Временная иерархия ЭП разделяется на основные интервалы: долгосрочный (год), среднесрочный (месяц), краткосрочный (сутки) и оперативный (час). Расчет прогнозов потребления производится на всех временных интервалах с последовательным уточнением результатов по мере уменьшения времени упреждения. Для каждого вида прогноза необходимо использование различных методик. При этом наиболее высокие требования предъявляются к краткосрочным и оперативным прогнозам, поскольку именно они определяют управление текущим режимом работы энергосистемы [2].

Авторами статьи предлагается один из способов классификации методов прогнозирования временных рядов (ВР) тягового электропотребления, представленного на рис. 1. Особое внимание в данной классификации уделено факторам, влияющим на выбор методики прогнозирования электропотребления.

Практика показывает, что на основе лишь общих представлений о составлении прогноза сложно наладить квалифицированное прогнозирование электропотребления. Будущее потребление ЭЭ можно определять не только на базе статистических данных и некоторого учета факторов влияния, а рассчитать по правильным алгоритмам. Данный подход основывается на том обстоятельстве, что влияющие факторы и их весомость заранее известны. Кроме того, он предполагает создание математической модели объекта с использованием вычислительных ресурсов, специально созданных для этой цели.

Рациональным путем является разработка алгоритма выбора оптимальной методики прогнозирования ЭП в зависимости от имеющейся исходной информации.

Алгоритм выбора оптимальной методики прогнозирования электропотребления

Несмотря на безграничное число ситуаций и влияющих факторов, вносящих в процесс прогнозирования определенный вклад, можно выделить основные этапы прогнозирования временных рядов электропотребления (рис. 2).

Процесс прогнозирования начинается с рассмотрения имеющихся исходных данных для заданного периода упреждения. После определения переменных влияющих на ВР ЭП и проверки ряда условий производится расчет уравнения, описывающего форму кривой временного ряда ЭП. Процесс обычно является итерационным – сопровождается неоднократными повторениями, возвратами в исходную или промежуточную точки алгоритма-схемы, последовательными приближениями к «хорошей» модели.

В результате получаем методику, позволяющую осуществлять прогнозирование временных рядов с минимальным отклонением от фактического потребления ЭЭ.

Блок формирования исходных данных

Телом алгоритма является процесс выбора метода прогнозирования в соответствии с характером объекта, требований, предъявляемых к исходной информации с количественной и качественной оценкой (наличие или отсутствие тенденции, сезонности, цикличности, инертности, аномальных и пропущенных значений; длина ВР; сопоставимость данных и т. д.).

Блок формирования исходных данных представлен на рис. 3.

При выборе оптимальной методики прогнозирования важным показателем является величина, обратная величине глубины упреждения, показывающая необходимую длину эволюционного цикла.

По мнению отечественных и зарубежных ученых, она должна быть в три раза больше абсолютного времени упреждения:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{t_x}{\Delta t} \geq 3, \qquad (1)$$

где Δt – абсолютное время упреждения;

t_x – величина эволюционного цикла объекта.

Блок выбора информационной базы

Немаловажным условием принятия решений является сама глубина упреждения прогноза (рис. 4), при этом его необходимо отнести к длине эволюционного цикла развития объекта прогнозирования.

Для этого можно воспользоваться предложенным В. Белоконем безразмерным показателем глубины [3]:

$$\tau = \frac{\Delta t}{t_x}. \qquad (2)$$

Если величина глубины упреждения укладывается в эволюционный цикл $\tau << 1$, то действительными в выборе являются фактографические методы. Если же в прогнозном периоде укладываются несколько эволюционных циклов развития $\tau >> 1$, то большее значение имеют методы экспертных оценок.

Наиболее распространенным методом оценки параметров зависимостей являются метод наименьших квадратов (МНК) и его модификации.

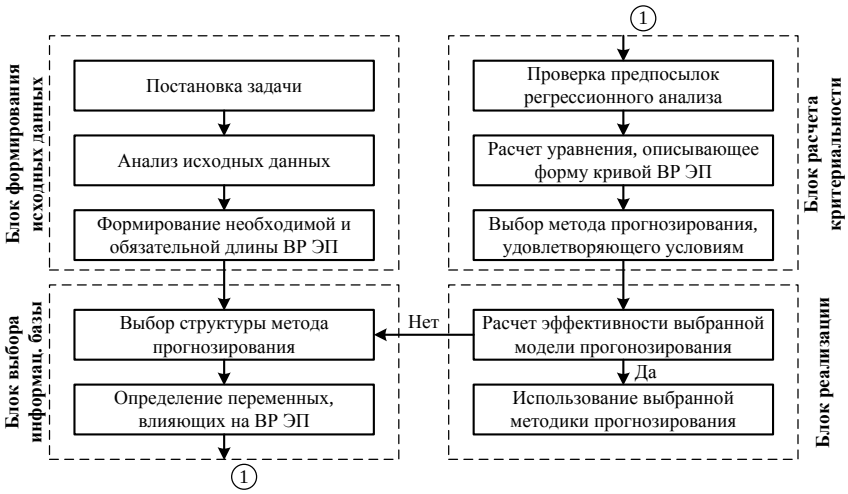


Рис. 2. Процесс выбора оптимальной методики прогнозирования

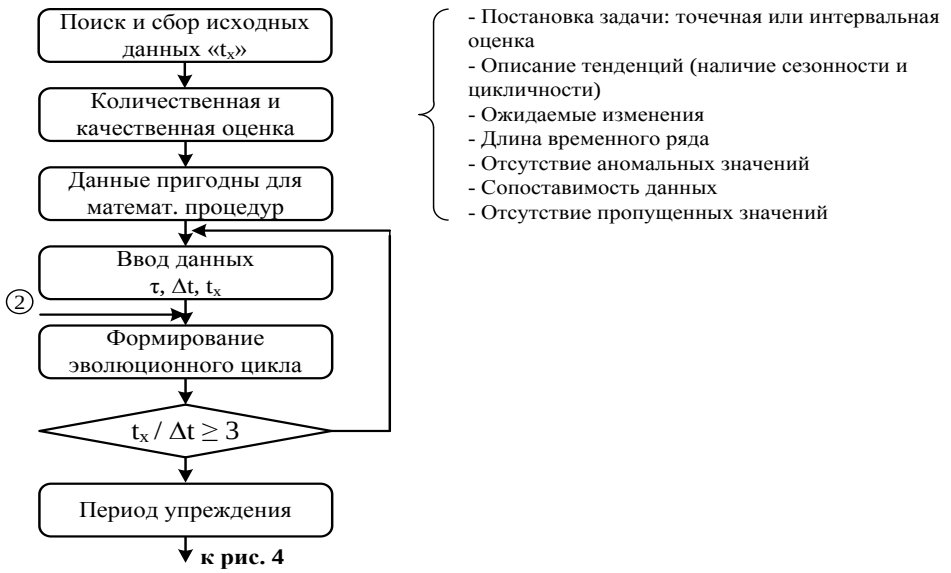


Рис. 3. Блок формирования исходных данных

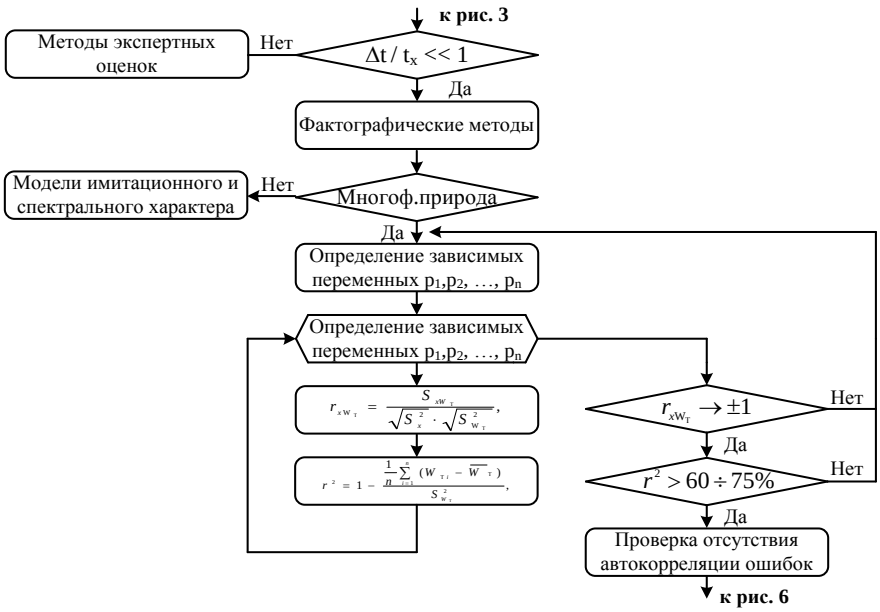


Рис. 4. Блок выбора информационной базы

Расчет параметров модели тренда, минимизирующей ее отклонения от точек исходного временного ряда, определяется как:

$$S = \sum_{i=1}^{n} (\hat{W}_i - W_i)^2 \to \min, \qquad (3)$$

где $\hat{W}_i$ – прогнозное значение ЭП;

W_i – фактическое значение ЭП;

n – число наблюдений.

Теснота связи между отдельными влияющими факторами и тяговым электропотреблением W_T определяется как:

$$r_{x\mathrm{W_T}} = \frac{S_{xW_\mathrm{T}}}{\sqrt{S_x^2} \cdot \sqrt{S_{\mathrm{W_T}}^2}}, \qquad (4)$$

где $S_{x\mathrm{W_T}} = \overline{x \cdot W}_\mathrm{T} - \overline{x} \cdot \overline{\mathrm{W}}_\mathrm{T}$.

Проведя тщательный корреляционный анализ, необходимо отметить оптимальное число влияющих на ЭП факторов и составить прогностическое уравнение множественной регрессии.

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x - \overline{x})^2}{n}; \quad S_{W_\mathrm{T}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} (W_{\mathrm{T}i} - \overline{W}_\mathrm{T})^2}{n},$$

где x и W_{Ti} – выборка влияющего фактора и ЭП;

$\overline{x}$ и $\overline{W_{Ti}}$ – выборочная средняя влияющего фактора и электропотребления;

S_x^2 – выборочная дисперсия фактора;

$S_{W_T}^2$ – выборочная дисперсия электропотребления.

Оценка адекватности модели и характеристика ее прогностической силы определяется как:

$$r^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (W_{\mathrm{T}i} - \overline{W}_\mathrm{T})}{S_{W_\mathrm{T}}^2}. \qquad (5)$$

В соответствии с разработанным алгоритмом выбора оптимальной методики были определены основные критерии выбора, влияющие на результат поставленной цели. Это длина эволюционного цикла (ДЦ), глубина периода упреждения (ГУ), многофакторная природа (МП), коэффициент корреляции (КК) между ЭП и влияющими факторами, коэффициент детерминации (КД), наличие автокорреляции (А), наличие сезонности (С), наличие инертности (И) и выполнение предпосылок регрессии (ВП). В свою очередь каждый критерий влияет на методы прогнозирования (альтернативы). В качестве базовых альтернатив используются наиболее удачные методы с минимальной погрешностью прогнозирования. Это адаптивный метод (АМ), нейронные сети (НС), регрессионная модель (РМ), авторегрессионная модель (АМ), имитационная моделирование (ИМ), спектральный анализ (СА) и экспоненциальное сглаживание (ЭС).

Иерархическая структура с несколькими уровнями: цель – альтернативы – критерии представлена на рис. 5.

Матричная форма влияния друг на друга критериев имеет следующий вид [4]:

	ДЦ	ГУ	МП	КК	КД	А	С	И	ВП
ДЦ	1	3	3	5	7	9	9	8	8
ГУ	1/3	1	3	3	4	5	5	7	7
МП	1/3	1/3	1	5	5	3	5	4	9
КК	1/5	1/3	1/5	1	3	3	3	3	3
КД	1/7	1/4	1/5	1/3	1	3	3	3	3
А	1/9	1/5	1/3	1/3	1/3	1	3	3	3
С	1/9	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3	1	3	3
И	1/8	1/7	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1	3
ВП	1/8	1/7	1/9	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1

(6)

Блок расчета критериальности

Использование процедуры оценки, основанной на МНК, предполагает обязательное удовлетворение целого ряда предпосылок, невыполнение которых может привести к значительным ошибкам.

1. Отсутствие автокорреляции ошибок, т. е. значения ошибок различных наблюдений независимы друг от друга. Алгоритм проверки отсутствия автокорреляции представлен на рис. 6.

$$M(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0, (i \neq j). \quad (7)$$

Наиболее простым и достаточно обоснованным из ряда приемов обнаружения автокорреляции является метод, предложенный Дарбином и Уотсоном:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^{n} (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^{n} e_t^2}. \quad (8)$$

Коэффициент автокорреляции первого порядка находится как:

$$R = \frac{\sum_{t=2}^{n} e_t \cdot e_{t-1}}{\sum_{t=1}^{n} e_t^2}, \quad (9)$$

Оптимальная методика прогнозирования ВР электропотребления

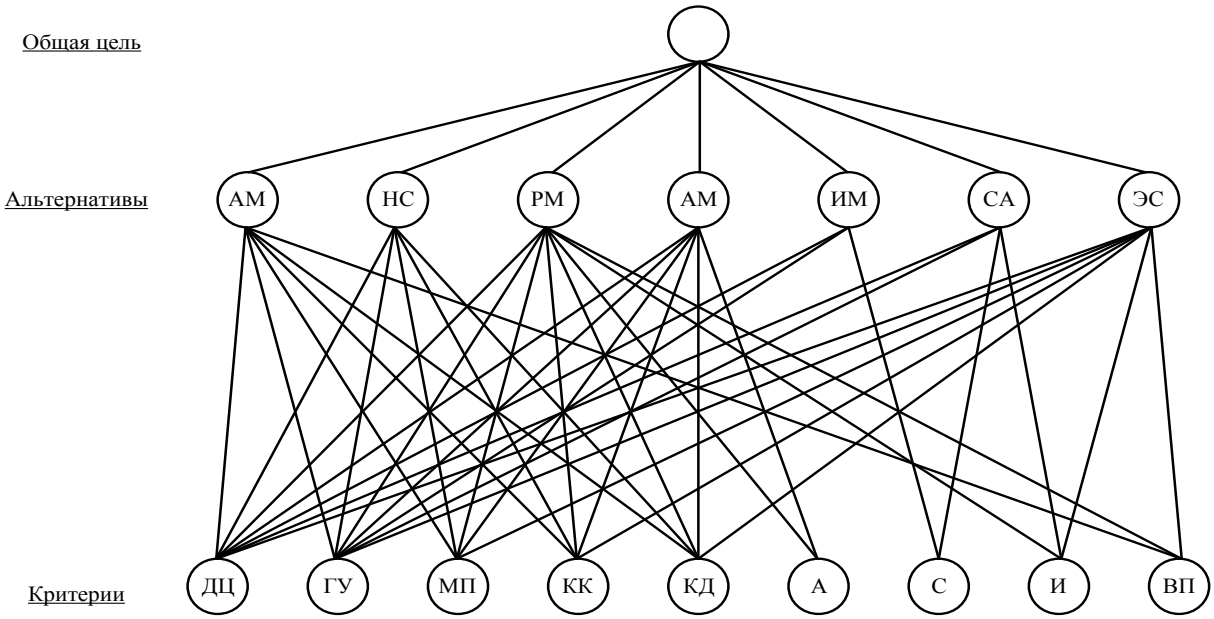


Рис. 5. Иерархическая структура достижения цели

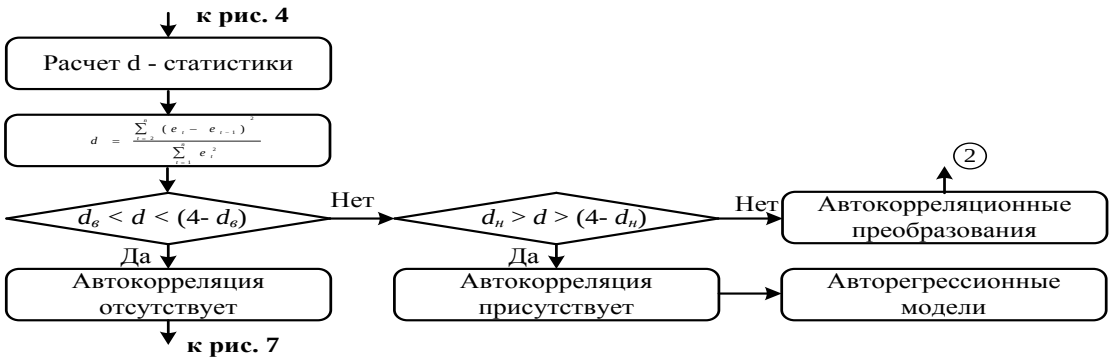


Рис. 6. Алгоритм проверки отсутствия автокорреляции

где e_i – ошибка при прогнозировании.

При обнаружении существенной автокорреляции отклонений от регрессии логично признать наличие ошибки в спецификации уравнения. Необходимо вернуться к этой проблеме, пересмотреть набор переменных и уточнить форму уравнения. В ряде случаев существенное уменьшение автокорреляции остатков дает включение в уравнение такой переменной, как время.

2. Случайные ошибки имеют нулевую среднюю, конечные дисперсии и ковариации.

3. Каждое измерение случайной ошибки характеризуется нулевым средним, не зависящим от значений наблюдаемых переменных.

4. Дисперсии каждой случайной ошибки одинаковы, их величины независимы от значений наблюдаемых переменных.

$$D(\varepsilon_i) = \sigma^2. \quad (10)$$

5. Случайные ошибки имеют нормальное распределение.

$$M(X) = a,\ D(X) = \sigma^2. \quad (11)$$

6. Значения эндогенной переменой свободны от ошибок измерения и имеют конечные средние значения и дисперсии.

Алгоритм проверки предпосылок можно проследить по рис. 7.

Одна из основных проблем в выборе оптимальной методики есть проблема выбора формы кривой, решение которой определяют результаты экстраполяции тренда. Алгоритм выбора уравнения кривой описывающего ВР ЭП представлен на рис. 8. На сегодняшний день существует несколько практических подходов [5]. Для выбора вида функциональной зависимости используется прием, основанный на определении соотношений между изменениями входной и выходной величины, предполагающий ту или иную функциональную зависимость.

Вводятся понятия о приращении зависимой и независимой переменной Δy и Δx, т. е. $\Delta y = y_t - y_{t-1}$; $\Delta x = x_t - x_{t-1}$. Зависимость приращений переменных и формы кривой можно проследить в табл. 1.

Блок реализации

Чтобы оценить возможные преимущества выбранного метода прогнозирования временных рядов тягового электропотребления, необходимо выявить его эффективность (алгоритм изображен на рис. 9). Под эффективностью следует понимать меру оценки достоверности прогноза, являющуюся основанием для принятия оптимального решения.

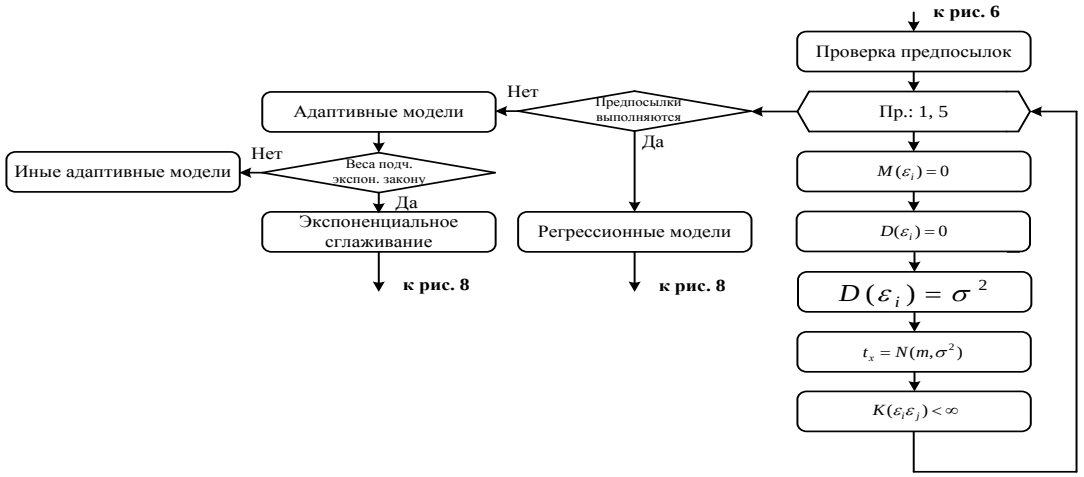


Рис. 7. Алгоритм проверки предпосылок регрессионного анализа

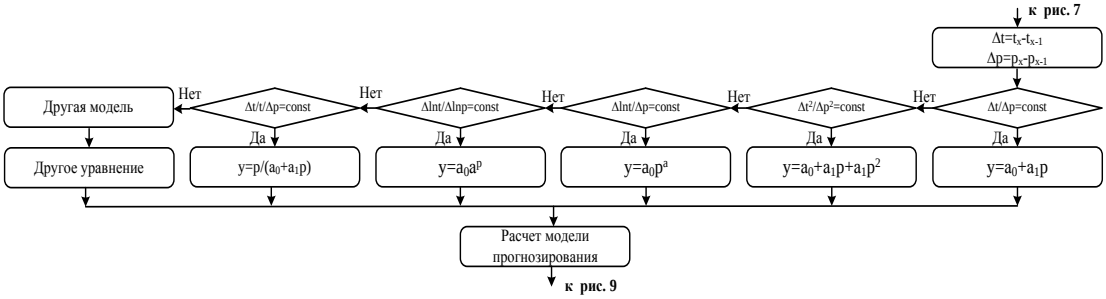


Рис. 8. Алгоритм выбора уравнения кривой временного ряда

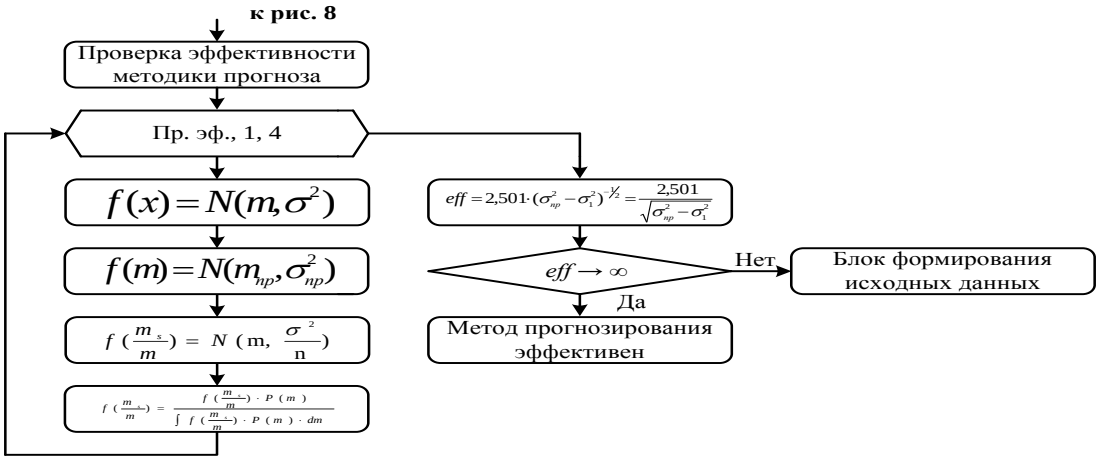


Рис. 9. Алгоритм проверки эффективности метода прогнозирования

Таблица 1

Зависимость вида кривой от показателей

Характер изменения показателей во времени	Вид кривой
$\frac{\Delta y}{\Delta x}=const$	$y=a_0+a_1\cdot x$
$\frac{\Delta \ln y}{\Delta x}=const$	$y=a_0\cdot x^a$
$\frac{\Delta \ln y}{\Delta \ln x}=const$	$y=a_0\cdot a_1^x$
$\frac{\Delta y^2}{\Delta x^2}=const$	$y=a_0+a_1\cdot x+a_2\cdot x^2$
$\frac{\Delta(\frac{x}{y})}{\Delta x}=const$	$y=\frac{x}{a_0+a_1\cdot x}$

О точности и надежности метода прогнозирования можно судить по тому, насколько результаты, полученные с его помощью, соответствуют реальным значениям.

Наиболее удачной и в ряде случаев позволяющей однозначно отвечать на вопрос о точности и надежности получаемого прогноза является используемая на практике процедура ретроспективного анализа.

Пусть исследуемый (прогнозный процесс) имеет нормальное распределение:

$$f(x)=N(m,\sigma^2), \qquad (12)$$

где m – математическое ожидание;

σ^2 – дисперсия процесса.

Пусть некоторые дополнительные наблюдения на ретроспективном участке дают значение исследуемого процесса m_s. Данное значение является средней величиной некоторой выборки $x_1, \ldots, x_n$. Среднее значение этой выборки есть нормально распределенная случайная величина.

Для любого фиксированного значения математического ожидания процесса m распределение при реализованном среднем значении выборки будет выражаться в виде:

$$f\left(\frac{m_s}{m}\right)=N\left(\mathrm{m},\frac{\sigma^2}{\mathrm{n}}\right). \qquad (13)$$

Для принятия решения по рассматриваемому процессу необходимо знать апостериорное распределение, которое будет определяться по формуле Байса:

$$f(\frac{m_s}{m})=\frac{f(\frac{m_s}{m})\cdot P(m)}{\int f(\frac{m_s}{m})\cdot P(m)\cdot dm}. \qquad (14)$$

Величину дисперсий σ^2 и σ^2_{np} можно рассматривать как меру априорной достоверности гипотезы относительно величины математического ожидания рассматриваемого процесса. В то же время несовершенный прогноз дает большое значение дисперсии σ^2_{np} и делает это отношение маленьким.

Таким образом, чем больше дисперсии прогноза, тем меньше эффективность используемого метода прогноза. Непосредственно эффективность прогноза получается как:

$$eff=2{,}501\cdot(\sigma^2_{np}-\sigma^2_1)^{-1/2}=\frac{2{,}501}{\sqrt{\sigma^2_{np}-\sigma^2_1}}. \qquad (15)$$

Полученное выражение позволяет численно определить, какой из конкурирующих методов дает лучшие результат.

Данная методика позволяет получить оперативный прогноз ВР ЭП, а также определить весовые коэффициенты каждого критерия (наличие или отсутствие тенденции, корреляции, автокорреляции, многофакторной природы; длина ВР;

глубина периода упреждения; выполнение предпосылок регрессионного анализа) относительно рассматриваемых методов прогнозирования. Итоговая матрица весовых коэффициентов для каждого критерия имеет следующий вид:

	ДЦ	*ГУ*	*МП*	*КК*	*КД*	*А*	*С*	*И*	*ВП*	b_i
АМ	*1,01*	1,00	1,05	1,44	1,44	1,00	0,97	0,97	1,05	11,08
НС	*1,01*	1,00	1,05	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,05	10,02
РМ	*1,01*	1,00	0,97	1,02	1,02	1,00	1,00	1,00	1,05	9,95
АМ	*1,01*	0,91	1,07	1,22	1,22	1,00	1,06	1,06	1,15	10,69
ИМ	*1,02*	1,12	1,09	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,18	10,33
СА	*0,98*	1,14	1,02	1,01	1,01	1,00	1,00	1,00	1,18	10,21
ЭС	*0,98*	1,14	1,18	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,05	10,29

(16)

Наилучшей методикой оперативного прогнозирования электропотребления железнодорожного транспорта при наличии сведений о суточном грузообороте и температуры окружающей среды является модифицированный адаптивный метод множественной регрессии с величиной полезности, равной 11,08.

Графическое представление фактического электропотребления и результатов прогнозирования тягового электропотребления адаптивным методом множественной регрессии изображено на рис. 10. Максимальная погрешность лежит в пределах интервала ±5 %.

Заключение

1. Предложена классификация методов прогнозирования временных рядов электропотребления.
2. Разработана система критериев и алгоритм выбора оптимальной методики прогнозирования временных рядов электропотребления в зависимости от имеющейся исходной информации.
3. Оптимальной методикой оперативного прогнозирования ЭП является модифицированный адаптивный метод множественной регрессии.
4. Погрешность прогнозирования тягового электропотребления адаптивным методом множественной регрессии удовлетворяет требованиям работы на рынках ЭЭ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дурнов В. Г., Раевский Н. В., Яковлев Д. А. Прогнозирование электропотребления : сб. тр. XV Междунар. научно-практ. конф. «Современные техника и технологии».– Томск : Изд. Томск. политехн. ун-та, 2009. — Т. 1. – 613 с.
2. Большов Л. А. Прогнозирование энергопотребления: современные подходы и пример исследования. // Известия наук Энергетика. – 2004. – № 6.
3. Бестужев-Лада И. В. Рабочая книга по прогнозированию. – М. : Мысль, 1982. – 430 с.
4. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и связь, 1993.
5. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Статистика, 1977. – 200 с. : ил.

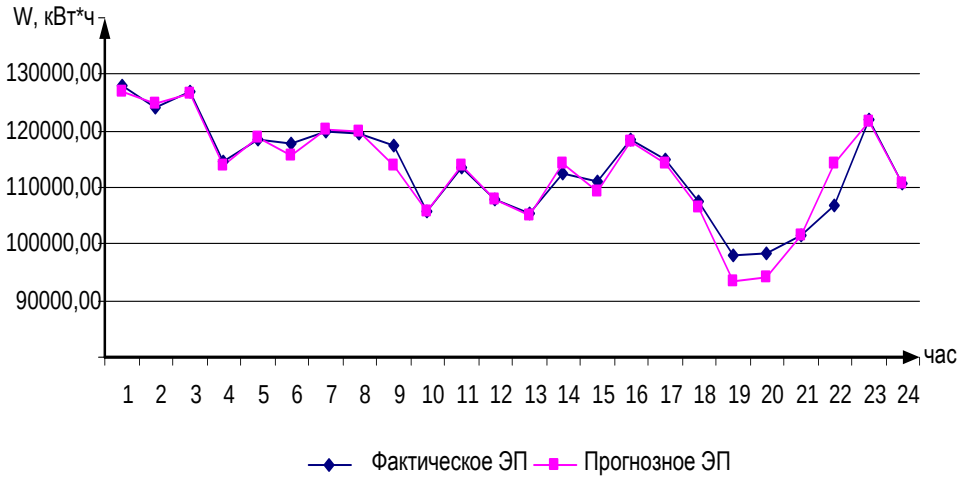


Рис. 10. Соотношение фактического и прогнозного электропотребления

УДК 332.14

Грошева Надежда Борисовна,
канд. экон. наук, профессор кафедры «Финансовый менеджмент» ИрГУПС
Чанчиков Александр Сергеевич,
соискатель ИрГТУ, e-mail: as2810@mail.ru

ДИСКОНТИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РЕЗУЛЬТАТА ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ ССД

N.B. Grosheva, A.S. Chanchikov

DISCOUNTING OF SOCIAL AND ECONOMIC RESULT OF INNOVATIVE PROJECTS ON THE BASIS OF SDR

Аннотация. *В статье рассматривается применение социальных ставок дисконтирования для оценки социально-экономического результата инновационных проектов.*

Ключевые слова: *инновационные проекты, социальная ставка*.

Abstract. *In the article application of social rates of discounting for the estimation of social and economic result of innovative projects is considered.*

Keywords: *innovative projects, social rate.*

Для отбора и приоритезации инновационных проектов с позиции увеличения благосостояния населения необходимо учитывать долгосрочный эффект от проекта. Соответственно, для сопоставления проектов и для оценки их эффективности должна быть использована концепция дисконтирования. При определении ставки дисконтирования стандартный подход, используемый при оценке инвестиционных коммерческих проектов, неприменим, так как в чистом виде сравнивать рыночную стоимость капитала не представляется возможным.

Необходимость дисконтирования вызвана как снижением ценности денег во времени, так и снижением ценности благ, которые будут получены в будущем. Снижение ценности (стоимости) денег во времени зависит от инфляции. Если говорить о проектах общественного сектора или общественных предпочтениях, то снижение ценности вызвано неуверенностью в будущем (в частности, есть сомнения в том, что данные блага будут получены конкретным выгодоприобретателем) и сомнениями в том, что данные блага вообще будут реализованы в перспективе (с позиции благосостояния населения человек может сменить территорию проживания или не дожить до момента получения блага). Чем дольше срок реализации проекта, тем ниже ценность его результатов для сегодняшнего потребителя благ. Кроме того, существует теория общественных предпочтений, согласно которой благо сегодня (то есть немедленное потребление) всегда предпочтительнее блага, которое будет получено позже (так называемый феномен временных предпочтений, time preference).

Корпоративные подходы к дисконтированию основаны на приведении стоимости будущих благ к сегодняшней стоимости. Основной используемый подход – это концепция «Present value» – текущей стоимости, позволяющий в том числе сравнивать проекты с разными сроками реализации. Формула текущей стоимости (или приведения стоимости конкретного периода к текущей) выражается как

$$PV = \frac{FV}{(1+i)^n}, \quad (1)$$

где FV – это будущая стоимость, i – ставка дисконтирования, n – количество периодов между текущим моментом и моментом получения или ожидания получения прибыли (блага).

Ставка дисконтирования корпоративных проектов зависит от индивидуальной ценности (стоимости) ресурсов для собственников капитала и от «стоимости упущенных возможностей» – финансовых ожиданий от альтернативных проектов. Кроме того, проекты общественного сектора, как уже говорилось выше, характеризуются для потребителей благ высоким уровнем неопределенности и риска.

В международной практике предлагается несколько вариантов определения ставки дисконтирования для проектов общественного сектора, однако в практике РФ такие методы практически не используются, поскольку нет достаточного статистического материала, базы исследований. Кроме того, в РФ значительны различия между регионами и секторами экономики, поэтому для каждо-

го отдельного проекта необходима корректировка ставки.

Три основных подхода к определению ставки дисконтирования для проектов общественного сектора приведены ниже.

Таблица 1

Методы определения ставок дисконтирования в общественном секторе

Наименование метода (рус.)	Наименование метода (англ.)	Сущность метода
Социальная ставка межвременных предпочтений	Social rate of time preferences, SRTP	Оценка временных предпочтений общества относительно потребления, основана на функции общественной полезности, получаемой от потребления
Социальная альтернативная стоимость капитала	Social opportunity cost of capital, SOC	Сравнительная оценка инвестирования – альтернативная доходность общества как инвесторов
Определение теневой цены капитала	Shadow price of capital, SPC	

В условиях совершенного рынка SRTP и SOC должны совпадать. Оба подхода оценивают упущенные возможности, однако первый метод оценивает ставку дисконтирования как норму доходности для инвестора, которую можно ожидать от альтернативных проектов с учетом риска, второй подход оценивает ставку дисконтирования как ценность потребления в различные периоды. В условиях несовершенного рынка ставки отличаются.

Линия сбережения (*S*) показывает ценность с позиции потребления в настоящее время или отложенного потребления. Потребление сейчас не создает возможности для сбережения, в то время как сбережения – это возможность инвестирования в будущем, но не в настоящее время. Люди будут сберегать больше, если норма доходности (*RR*) будет выше. Линия потребления отражает социальную ставку межвременных предпочтений.

Линия инвестиций (*I*) показывает взаимосвязь межу тем, сколько инвестор получает на разных уровнях инвестирования. Если норма доходности падает, то компании получат больше рабочего капитала. Фактически *I* отражает спрос на капитал и может быть использована как отражение социальной альтернативной стоимости капитала.

На совершенном рынке с нормой доходности *n* соблюдается баланс между инвестициями и сбережениями, однако в условиях несовершенного рынка люди как инвесторы и как потребители оценивают норму доходности различно.

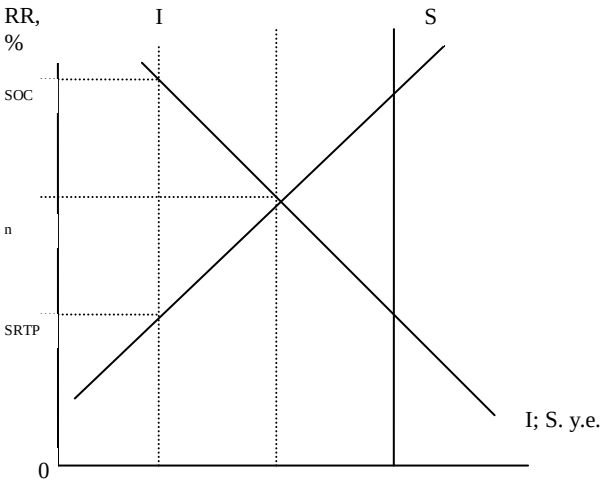


Рис. 1. Различие ставок в условиях несовершенного рынка

Для снижения дисбаланса ставок может быть использован метод теневой цены капитала, который представляет собой приведенную стоимость потоков потребления, возникающую в результате осуществления инвестиций.

Несомненно, основной задачей применения ставок для оценки конкретных проектов является расчет ставок.

В российских условиях наиболее применимой для оценки проектов общественного сектора является формула расчета социальной альтернативной стоимости капитала с учетом ставки социальных межвременных предпочтений, разработанная и апробированная в исследованиях, проведенных в ВШЭ:

$$SRTP = (1+g)\mu(1+\rho) - 1, \qquad (2)$$

где ставка межвременных предпочтений оценивается через темп прироста потребления на душу населения, чистой ставки межвременных предпочтений, функции общественной полезности от потребления. Расчетная ставка для России составляет около 2,8 %. Данная ставка корректируется в зависимости от региональной специфики.

Формула для расчета социальной альтернативной стоимости капитала включает в себя нормы обесценения капитала, ставку реинвестирования капитала, рентабельность собственного капи-

тала. Расчет основан на предположении, что расходы государства должны приносить обществу не меньшую отдачу, чем альтернативные проекты, реализуемые в частном секторе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Restoration Economics: Discounting and Time Preference. NOOA. [Электронный ресурс]. – URL : www.csc.noaa.gov/coastal/economics/discounting.htm (дата обращения 14.03.2011)
2. A social time preference rate for use in long-term discounting: Oxera 2002. [Электронный ресурс]. – URL : The Office of the DPM, DfT, DoEFRA (дата обращения 14.03.2011).
3. Determining the Discount Rate for Government Projects (WP 02/21). The Treasury. [Электронный ресурс]. – URL : http://www.treasury.govt.nz (дата обращения 14.03.2011).
4. Шелунцова М. А., Емельянов А. М. Использование подхода ставки межвременных предпочтений для оценки социальной ставки дисконтирования // Корпоративные финансы. – 2007. – № 1. – С. 9–21.
5. Оценка некоммерческого проекта по защите шельфа. [Электронный ресурс]. – URL : www.csc.noaa.gov/coastal/economics/ (дата обращения 15.03.2011).

УДК 330.342

Батукова Луиза Рихардовна,
канд. экон. наук, ГОУ ВПО «Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева» (СибГАУ),
e-mail: malilu@yandex.ru

ПРОБЛЕМА ЗАПУСКА ПРОЦЕССА ИННОВАЦИОННОЙ МОДЕРНИЗАЦИИ В ТРУДАХ РОССИЙСКИХ УЧЕНЫХ

L.R. Batukova

PROBLEM OF START OF PROCESS OF INNOVATIVE MODERNIZATION IN WORKS OF THE RUSSIAN SCIENTISTS

Аннотация. *В статье раскрываются содержание и основные тенденции состояния человеческого капитала, его роль в формировании инновационной восприимчивости регионов. Приводится обзор понятий категории «качество образования» и обосновывается необходимость совершенствования методики оценки качества образовательных услуг, как основных составляющих кадровой и образовательной характеристик человеческого фактора инновационной восприимчивости.*

Ключевые слова: *инновационная восприимчивость, факторы инновационной восприимчивости, человеческий капитал, качество образования, рейтинг, методика составления рейтинга*.

Abstract. *In the article the maintenance and the basic tendencies of condition of the human capital, its role in formation of the innovative susceptibility of regions are revealed. The review of concepts of the category «quality of formation» is resulted and necessity of perfection of the technique of estimation of quality of educational services as basic components of personnel and educational characteristics of the human factor of the innovative susceptibility is proved.*

Keywords: *innovative susceptibility, factors of innovative susceptibility, human capital, quality of formation, rating, technique of drawing up of a rating*.

Особенность текущего периода развития мировой экономики состоит в том, что все агенты экономических отношений вынуждены жестко конкурировать между собой за выживание. Это приводит к тому, что процессы модернизации приобретают глобальный, перманентный характер. Во всех странах и регионах планеты в большей или меньшей мере предпринимаются усилия по выявлению перспективных методологических подходов к модернизации производственной структуры и отношений, формированию целей и системы мотивов, которые бы направили энергию труда людей на развитие экономики. В России также уделяется значительное внимание данной тематике.

Так, Е. Балацкий предлагает подойти к решению данной проблемы, опираясь на анализ модели инновационных инвестиционных решений. Суть его рассуждений в следующем. Любая экономическая система постоянно эволюционирует. При этом изменяются как ее количественные, так и качественные параметры. Движущей силой такой эволюции является проток инвестиционных решений, направленных (либо не направленных) на внедрение инноваций. Субъекты системы, распоряжающиеся ее ресурсами, постоянно находятся

перед выбором: осуществить инновацию или отказаться от нее. Таким образом, решения принимаются на субъективном уровне. В качестве инновации могут быть рассмотрены новые товары (услуги), новые технологии (производственные и управленческие) и новые институты (правила взаимодействия). Однако, механизм внедрения данных инноваций универсален. Субъект инвестиционного решения делает выбор об инвестиции средств на основе анализа соотношения старых (Cs) и новых (Cn) текущих производственных издержек, а также капитальных затрат (Ко), возникающих при внедрении инновации.

Логика принятия решения при этом неизменна: либо получить выигрыш на издержках, либо получить более высокий доход. Е. Балацкий формулирует правило запуска инноваций, которое гласит, что «внедрение инноваций будет осуществляться тогда, когда норма прибыли трансформационной операции, по крайней мере, больше нуля (r > 0), а в некоторых случаях и больше некоторого минимального уровня r* (r > r*); в противном случае инновации блокируются» [1].

Данное правило является единым для всех инвестиционных решений. Для его доказательства автор вводит уравнение (1), которое интерпретируется как условие равновесия инновационно развивающейся экономической системы

$$\int_0^{\tau}\left[C_S(t)-C_N(t)\right]dt=\left(1+r\right)K_0, \qquad (1)$$

где t – время (например, год); τ – период времени, в течение которого фирма предполагает окупить осуществляемые инновации (горизонт планирования); r – эффективность (процент) вложений в инновацию за весь рассматриваемый период τ, Cs – старые производственные издержки, Cn – новые производственные издержки, K_0 – капитальные затраты (или инвестиции в инновации).

Если анализируются технологические инновации, то уравнение (1) интерпретируется как условие технологического равновесия, показатели Cs и Cn – как текущие производственные издержки, а цена инноваций K_0 – как капитальные затраты (инвестиции). Если рассматриваются институциональные инновации, то соотношение (1) интерпретируется как условие институционального равновесия, показатели Cs и Cn – как трансакционные издержки, а цена инноваций K_0 – как трансформационные издержки. Соответственно внедрение инноваций будет осуществляться тогда, когда норма прибыли трансформационной операции, по крайней мере, больше нуля (r > 0), а в некоторых случаях и больше некоторого минимального уровня r* (r > r*); в противном случае инновации блокируются.

Анализируя данное математическое утверждение, Е. Балацкий приводит его к следующему виду:

$$e^{\lambda\tau}-1=\nu\lambda\,(1+r), \qquad (2)$$

где $\nu = K_0/[x_0(Cs - Cn)]$, при этом x_0 – значение x в начальный момент времени, если темп прироста выручки экономической системы постоянен во времени и равен $\lambda = (1/x)(dx/dt)$, а $x(t) = x_0e^{\lambda t}$.

λ – темп экономического роста, определяемого ростом рынков сбыта;

λ^* – темп экономического роста, служащий границей инновационной дихотомии: при низких темпах роста инновация невыгодна, при достаточно высоких – выгодна;

τ – горизонт планирования ($\tau > \tau^*$);

τ^* – горизонт планирования, служащий границей инновационной дихотомии: запуск инноваций идет только по достижении данной критической величины горизонта планирования.

Соотношение (2) дает возможность геометрически интерпретировать модель механизма запуска инноваций. Так, если экспоненциальная (левая) часть соотношения (2) больше его линейной (правой) части, то инновацию следует внедрять; в противном случае внедрение инновации нецелесообразно (рис. 1).

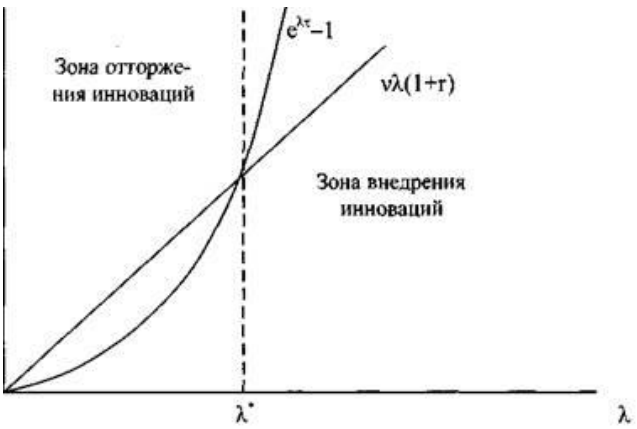


Рис. 1. Зависимость механизма запуска инноваций от темпов экономического роста [1]

Данная схема наглядно иллюстрирует следующие выводы:

1. При низких темпах роста инновация невыгодна, при достаточно высоких – выгодна. Следовательно, темпы роста системы являются самостоятельным фактором инновационного процесса.

2. При минимальных горизонтах планирования запуск инноваций невозможен. Он идет только по достижении некой критической величины горизонта планирования ($\tau > \tau^*$).

Данный механизм бинарного выбора является и методологической основой для системного объяснения многих экономических явлений. Е. Балацкий считает, что данная зависимость подтверждает закон перехода количества в качество при эволюции экономических систем. Если обратиться к уравнению (2), то оно задает простую дихотомию: если левая часть больше правой, то инновация осуществляется; если имеет место обратная ситуация, то система остается в прежнем состоянии; при равенстве правой и левой частей возникает паритет (равновесие) двух альтернатив и неопределенность в принятии инвестиционного решения. Таким образом, модель (2) описывает некий дискретный процесс перескока хозяйственной системы из одного состояния в другое.

На основе данной модели Е. Балацкий делает принципиальный вывод о том, что переход в новое состояние зависит от следующих экономических переменных: рыночной экспансии и уровня финансовых запросов инвестора (r) (наименование переменных дано в редакции автора настоящей статьи).

При этом рыночная экспансия – это сложная переменная, определяющаяся, в свою очередь, двумя переменными. Во-первых, ростом рынков сбыта (λ). Рынки сбыта в данном случае могут расти и за счет расширения географии, и за счет увеличения внутреннего спроса. Причем внутренний спрос может увеличиваться как за счет увеличения численности потребителей, так и за счет повышения конкурентоспособности отечественного производителя, вытесняющего иностранного товаропроизводителя. Во-вторых, рыночная экспансия определяется масштабностью горизонта планирования (τ).

Чаще всего в современном понимании горизонт планирования – это субъективно предполагаемая величина доходов и затрат в будущем. При этом ее рассматривают как пассивный аспект объекта планирования. Например, планируется развитие социально-экономической системы региона. Будущее рассматривается как объективный феномен, не зависящий от объекта планирования, как будущее вообще. То есть будущее – это будущее мировой системы хозяйствования. Регион на мировую систему повлиять не может, либо его влияние настолько минимально, что им можно пренебречь. Поэтому регион должен «понять», в каком направлении движется развитие, и «встроиться» в систему, занять свое место в мировом и региональном разделении труда. Таким образом, мы видим, что социально-экономическая система рассматривается скорее как пассивный объект, который пребывает в активном будущем. Но в реальности это не всегда так. И многие исследователи сегодня это доказывают.

Если рассмотреть горизонт планирования как категорию видения будущего, то она приобретает объективные черты. Сущность горизонта планирования как объективной величины состоит в следующем. Субъект (являющийся представителем объекта) на основе известных ему исследовательских технологий виртуально «побывал в будущем», «увидел будущее», оценил основные его характеристики. На основе анализа этих характеристик и настоящих, и будущих ресурсов, доступных для развития объекта, субъект делает выводы о стратегии развития определенных экономических подсистем, поддержке конкретных технологий, проектов. Это должно лечь в основу перспективных планов развития объекта планирования.

В данном случае категория горизонта планирования является активным аспектом объекта планирования.

Совершенно очевидно, что при недостаточном росте трех вышеуказанных величин решение об инновационном инвестировании может не состояться вовсе. Но если рыночная экспансия (первые два параметра модели (2)) будет непрерывно возрастать, то даже при убывании третьего параметра (уровень финансовых запросов инвестора), рано или поздно наступит момент, когда левая часть станет больше правой части. В этот момент система переходит на новые технологические или институциональные позиции и вся ее дальнейшая деятельность качественно изменяется. В широком смысле для нового состояния характерны более высокая экономическая эффективность производства и более высокий предел развития технологической кривой.

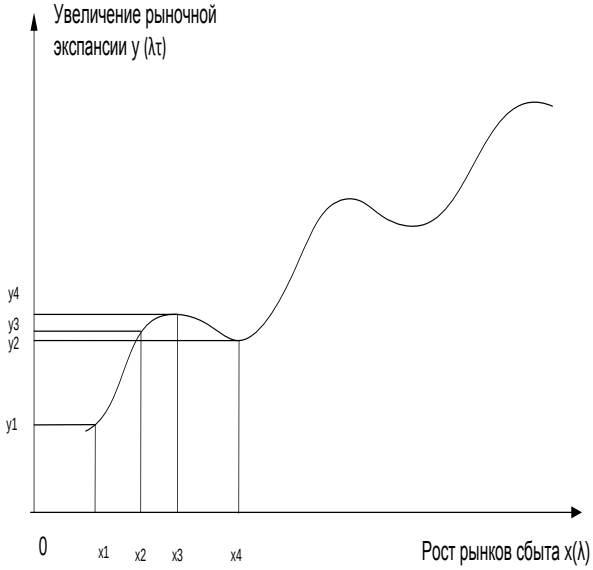
Таким образом, постоянно накапливающиеся прогрессивные изменения параметров модели в конечном итоге приводят к скачкообразному изменению деятельности системы. Тем самым медленные непрерывные сдвиги как бы «переливаются» в дискретный переход в качественно иное состояние [1]. Также анализ данной модели позволяет сделать весьма значительный методологический вывод. На решение об инвестировании средств в инновации воздействуют как объективные, так и субъективные детерминанты инноваций. Причем, если предположить, что уровень финансовых запросов инвестора условно фиксирован (r = const), то речь должна вестись только об интенсивности рыночной экспансии – о росте рынков сбыта (λ) и масштабности горизонта планирования (τ).

Рост рынков сбыта (λ) представляет собой объективный параметр внешней среды, характери-

зующий возможности роста рынков сбыта и соответственно – компаний, работающих на этих рынках. Категория планирования должна рассматриваться и как субъективная (пассивная), и как объективная (активная) детерминанта инновационного развития рассматриваемого объекта. В последнем случае идет речь о планировании на основе видения будущего, о выстраивании стратегии наиболее короткого и экономичного продвижения к нему.

Горизонт планирования (τ) является внутренним, субъективным параметром, формирующимся в голове у инвестора, и пассивным процессом «предсказания» будущего, пока речь идет об уже сложившихся процессах и явлениях, которые инвестор намерен использовать в свою пользу, то есть, пока речь идет о небольших горизонтах планирования. Когда речь заходит о будущем, которое еще не сформировалось, то горизонт планирования объективизируется и становится активным аспектом, «мостом», сокращающим путь в будущее.

Рассматривая категорию рыночной экспансии как категорию принятия инвестиционных решений в области инноваций, мы видим, что она является 2-факторной. Но только один параметр является детерминантой рыночного роста на коротких горизонтах планирования, а другой – детерминантой на длинных горизонтах планирования. Другими словами, мы имеем дело с системой координат, которая определяет расширение рынков сбыта по двум векторам – по вектору расширения рынков в краткосрочной перспективе и по вектору расширения рынка в долгосрочной перспективе. Причем под долгосрочной перспективой подразумевается не время в общепринятом понимании (годы, десятилетия), а период опережения современного уровня развития. То, что приведенные рассуждения являются верными, подтверждает график, представленный на рис. 2. На графике изображены волны экономического развития в системе координат долгосрочного – краткосрочного роста рынка (λτ – λ). Как видим, график экономического развития соответствует общепризнанной концепции циклической динамики социально-экономических систем. Из графика мы видим, что при доминировании скорости роста рынка по оси абсцисс скорость роста по оси ординат замедляется и наоборот. Это значит, что до тех пор, пока не исчерпаны возможности роста рынков сбыта на основе уже созданных технологий, фактор долгосрочного планирования находится в рецессивном состоянии и решений об инвестициях в базовые инновации не принимается. Но как только возможности роста рынков сбыта на основе уже созданных технологий исчерпаны, то фактором роста становится долгосрочное планирование инвестиций в «технологии будущего».



x1y1 – x2y2 – период роста рыночной экспансии на основе роста инвестиций в базовые инновации (оба фактора – λ и τ активны)

x2y2 – x3y3 – снижения темпов роста рыночной экспансии и продолжения роста рынков сбыта на основе освоения инвестиций в базовые инновации (снижение влияния фактора горизонта планирования τ)

x3y3 – x4y4 – период снижения рыночной экспансии на фоне снижения темпов роста обоих факторов рыночной экспансии (λ и τ снижаются)

Рис. 2. Динамика рыночной экспансии в зависимости от влияния факторов рыночной экспансии

Таким образом, при «схлопывании» пространственного фактора инновационных решений временной фактор все равно остается, и именно он начинает определять направленность дальнейшего развития. Следовательно, можно говорить о том, что технологическая и институциональная эволюция является следствием чередования доминирования указанных двух факторов – фактора роста рынков сбыта (λ) на коротких горизонтах развития и фактора долгосрочного планирования (τ), ориентированного на переход в будущее. Этот вывод особенно важен для российской экономики, так как совершенно очевидно, что фактор роста рынков сбыта (λ) для современной экономики России исчерпан. Но вполне доступен фактор долгосрочного планирования. Это значит, что для эффективной стратегии развития необходим анализ тенденций социально-экономического и технологического развития, с тем чтобы сформировать четкое видение будущего. Того будущего, которое еще не сформировалось, но предпосылки которого уже созрели. И именно инвестиции в это будущее являются для России сегодня основной задачей, выполнение которой позволит ей успешно выйти

из системного социально-экономического кризиса, в котором она пребывает.

Данный вывод позволяет предположить, что одним из эффективных подходов к формированию стратегии развития региональных социально-экономических систем России является подход на основе выявления глобальных социально-экономических и культурных тенденций, сопровождающих развитие общества, и формирования системы «обслуживания» данных тенденций. И действительно, многие аналитики склонны считать, что весьма перспективным подходом к формированию стратегии модернизации является именно данный подход.

Так, коллективом авторов [2] в статье «Направления технологической модернизации ведущих отраслей российской промышленности» предлагается формировать стратегию модернизации и инновационного развития как ответ на ряд серьезных структурных проблем, с которыми столкнулась Россия. Данные проблемы авторы определили как «вызовы» современного глобализирующегося мира – макроэкономический, сырьевой, социально-демографический. В табл. 1 представлена характеристика указанных вызовов.

Авторы данного исследования [2] указывают два подхода, на основе которых должна формироваться стратегия технологического развития экономики. Первый подход предполагает встраивание в международное разделение труда на основе мониторинга изменений на важнейших конкурентных рынках, особенно рынках природных ресурсов (предполагается мониторинг движения цен и изменения доступности природных ресурсов). Второй подход опирается на учет конкретных интересов субъектов деловой активности в области развития технологий – учет интересов предприятий и корпораций.

Стыковка данных подходов, по мнению авторов, должна осуществляться на отраслевом уровне и опираться на «на макроэкономический прогноз динамики рынков и важнейших ограничений, которые будут определять потребности в технологическом «ответе», с другой – на планы крупнейших компаний, работающих в соответствующих отраслях» [2].

Н.П. Залывский в статье «Российский вектор геоэкономического олимпа» обосновывает необходимость формирования геоэкономических и геополитических целей России, позволяющих достичь пика в реализации национальных интересов.

Таблица 1

Вызовы современности, стоящие перед Россией (составлено по материалам [2])

Вызовы	Характеристика
Макроэкономический	Исчерпание возможностей быстрого развития в рамках сложившейся сырьевой структуры экономики.
Сырьевой	Без реализации ряда капиталоемких и сложных в технологическом и организационном отношении проектов в области добычи и транспортировки нефти, уровень ее добычи стабилизируется около отметки 500 млн т в год к 2015 г.
	Уровень добычи газа будет повышаться. Но это приведет к его дефициту на внутреннем рынке. Частично этот дефицит будет покрыт ростом утилизации попутного газа с нефтяных месторождений, однако совсем избежать его не удастся.
	Переход к более капиталоемким проектам добычи нефти и газа вызовет снижение рентабельности и инвестиционной привлекательности данной отрасли. Так, переход к новым районам добычи энергоносителей (нефти в Восточной Сибири, газа на арктическом шельфе и др.) означает существенный рост ее капиталоемкости. Стоимость добычи нефти к 2030 г. возрастет в 1,5 раза, удельные капитальные вложения – в 1,3, газа – в 1,5 и 1,7 раза соответственно. Нельзя не учитывать и возможное начало разработки месторождений вязких нефтей и нефтяных песков, которые будут иметь еще большую капиталоемкость.
Социально-демографический	Происходит деградация человеческого капитала как в количественном (из-за демографических проблем), так и в качественном отношении. Последнее связано с возникновением «застойной бедности», выводящей крупные социальные группы из сферы воспроизводства качественного человеческого капитала.

Автор настаивает на том, что только на этой основе можно сформировать мотивы общественного трудолюбия, повышения морали и нравственности, аккумуляции и развития духовной энергии нации и современной национальной идентификации. А все это является необходимым условием достижения социально-экономического прогресса.

«У России есть все для экономического и технологического оппонирования однополюсному миру: необходимый набор и объем природных ресурсов; самая большая территория; тоска

людей по социальной справедливости и мотивация движения к ней; товар для мировых рынков, который дает деньги для масштабных геоэкономических инноваций. Хуже обстоит дело с публичным инициированием геополитической цели развития России для ближайшего столетия: быть правофланговым общественного прогресса, лидером земной цивилизации. Пора не быть апологетами вороха правильных фраз об общечеловеческих заботах и ценностях, о приобретении статуса гражданина Вселенной. Куда важнее учиться быть патриотом своего Отечества» [3].

Предложенный подход является, посуществу, органическим подходом к модернизации и предполагает формирование национальной идеи, объединяющей все слои общества. Для его реализации автором [3] предлагаются следующие меры.

1. «Воспроизводить из прошлого опыт и традиции бескорыстного духовного посвящения русского человека своей стране, подвергать остракизму стремление умножающейся армии антиобщественных паразитов к жизни в зазеркальной «другой» России, где рядовой наемный гражданин ощущает себя неуютно, сидит перед полупустым столом, как бы ни трудился вдохновенно» [3]. То есть речь идет о борьбе со сверх высокой дифференциацией граждан по уровню доходов, о формировании социально справедливого подхода к распределению создаваемых обществом материальных благ.

При современной дифференциации богатства и бедности в России можно сохранить только социальные конфликты и политические катаклизмы, но невозможно построить социальное государство, которое могло бы быть прообразом передового общества, отмечает автор.

2. «Помочь большинству россиян осознать стратегическую ценность курса на обновление великой державы» и «показать его позитивные последствия для судьбы конкретного гражданина» [3]. Данный пункт утверждает необходимость продвижения и массированной рекламы национальной идеи, которая должна быть положена в основу модернизации.

3. Также Н.П. Залывский настаивает на том, что необходимо развивать систему труда посредством гармонизации условий труда, комплексной механизации и автоматизации рабочих мест, оптимизации экологии рабочей зоны и охраны труда работника.

Он считает, что практическое внедрение данных принципов превратит отечественный корпоративный менеджмент в субъект «социально ответственного участника процесса превращения России в уважаемого учителя и авторитетного поводыря для народов земли, не склонных абсолютизировать американское измерение мира» [3].

4. Для преодоления диктата стратегических установок мирового потребляющего сообщества автор предлагает выстраивать экономическую и социальную политику «на базе декларирования и осуществления социальной стратегии России, где основной целью будет высшее качество жизни россиян и реальная справедливость общественного потребления» [3].

Для этого автор, в частности, предлагает вернуть в Россию часть резервов стабилизационного фонда, размещенных в форме ценных бумаг в западных финансовых учреждениях, для форсмажорного финансирования восстановления и развития транспортной инфраструктуры: формирования транспортной сети городов и поселков, отвечающей нормативным требованиям и потребностям экономики и общества завтрашнего дня, форсированного обновления и строительства новых инженерных коммуникаций городов и решения других инфраструктурных задач.

5. Также предлагается сформировать новую парадигму демократии, которая должна быть положена в основу обновленной государственности. В основе данной парадигмы должен находиться принцип совместной работы государства и личности человека, обеспечивающий достижение максимального развития личности и национального государства. Должно быть осуществлено строительство институциональной структуры для реализации данной парадигмы и продвижения ее в институциональную систему будущей Европы.

В заключение следует сказать, что анализ специальной литературы, посвященной данной тематике [4–7], позволяет сделать вывод о том, что многие другие исследователи из самых разных областей делают выводы, аналогичные тем, что сделаны Е. Балацким. И цели, предлагаемые данными авторами, также не вызывают возражения. Но общая проблема состоит в том, что, констатируя общие выводы о необходимости формирования стратегии модернизации на основе долгосрочных целей, встраивающих Россию, ее регионы в контекст общемирового прогресса, не предлагают подходы к изменению структуры системы труда общества, структуры производственного сектора, которые бы обеспечили достижение поставленных целей. Поэтому сегодня для формирования стратегии модернизации российской экономики является весьма актуальным выявление как системы достойных долгосрочных целей, так и теоретическое обоснование подходов к структурным изменениям системы общественного труда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балацкий Е. Модель экономической эволюции // Общество и экономика. – 2009. – № 8, С. 22–42. URL: http://ebiblioteka.ru/browse/doc/2194-3343. – (дата обращения 12.06.2011).
2. Белоусов Д. Р., Сальников В. А.,. Апокин А. Ю,. Фролов И. Э. Направления технологической модернизации ведущих отраслей Российской промышленности // Проблемы прогнозирования. – 2008. – № 6. – С. 3–18.
3. Залывский Н. П. Российский вектор геоэкономического олимпа // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 12. : URL: http://www.rae.ru/. (дата обращения 12.06.2011).
4. Чалдаева Л. А. Модернизация экономики: обоснование и экономическая эффективность // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, Стратегия развития экономики. – 2010. – 25(82). – С. 24–28.
5. Мартышев А. Н., Технологическая модернизация производства – главная задача промышленной политики в Евразийском экономическом сообществе // Евразийская интеграция: экономика, право, политика. – 2007. – № 2. – С. 96–99.
6. Нуреев Р. М. Стратегия и тактика Российской модернизации в свете концепции социального рыночного хозяйства // Экономич. вестн. Ростовского гос. ун-та. – 2006. – Т. 4. – С. 11–24.
7. Жихаревич Б. С. Стратегическое управление развитием макрорегиона окружног типа: необходимость и пути модернизации // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2010. – № 1 (58). – С. 138–140.
8. Митрофанова И. В. Стратегическое программирование развития макрорегиона: моногр. – Ростов-н/Д : Из-во ЮНЦ РАН, 2009.

УДК 378:331.2:001.895-021.465

Владимирова Ольга Николаевна,
канд. экон. наук, профессор кафедры «Финансы и кредит»,
Красноярский государственный торгово-экономический институт,
e-mail: olgav@akadem.ru

Дягель Оксана Юрьевна,
канд. экон. наук, доцент кафедры «Экономический анализ и статистика»,
Красноярский государственный торгово-экономический институт,
e-mail: dygel06@mail.ru

Крылова Марина Владимировна,
зам. начальника управления по обеспечению качества образования,
Красноярский государственный торгово-экономический институт,
e-mail: krilova@mail.kgtei.ru

КАЧЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО КАПИТАЛА В КОНТЕКСТЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ РЕГИОНА

O.N. Vladimirova, O.Ju. Dyagel, M.V. Krylova

QUALITY OF FORMATION AS THE FACTOR OF DEVELOPMENT OF THE HUMAN CAPITAL IN CONTEXT OF FORMATION OF THE INNOVATIVE SUSCEPTIBILITY OF A REGION

Аннотация. *В статье раскрываются содержание и основные тенденции состояния человеческого капитала, его роль в формировании инновационной восприимчивости регионов. Приводится обзор понятий категории «качество образования» и обосновывается необходимость совершенствования методики оценки качества образовательных услуг как основных составляющих кадровой и образовательной характеристик человеческого фактора инновационной воспримчивости.*

Ключевые слова: *инновационная восприимчивость, факторы инновационной восприимчивости, человеческий капитал, качество образования, рейтинг, методика составления рейтинга.*

Abstract. *In the article the maintenance and the basic tendencies of condition of the human capital, its role in formation of the innovative susceptibility*

of regions are revealed. The review of concepts of the category «quality of formation» is resulted and necessity of perfection of the technique of estimation of quality of educational services as basic components of personnel and educational characteristics of the human factor of the innovative susceptibility is proved.

Keywords: *innovative susceptibility, factors of innovative susceptibility, human capital, quality of formation, rating, technique of drawing up of a rating.*

Инновационная восприимчивость является важнейшей характеристикой, отражающей готовность региона к осуществлению инноваций, а ее формирование определяется рядом факторов и условий развития современной экономики. Среди совокупности групп таких факторов, в которую входят инновационная активность, техническая и технологическая обеспеченность, финансово- кредитное и инвестиционное обеспечение, нормативно-правовое, структурное и инфраструктурное обеспечение, авторами публикации в отдельную группу выделяется человеческий фактор [5].

Человеческий фактор помимо демографической и социальной ситуации, уровня дохода населения также включает в себя кадровую и образовательную составляющую. Учитывая данное обстоятельство, данная статья будет посвящена раскрытию условий, которые будут формировать предпосылки для оказания позитивного воздействия двух последних детерминант на инновационную восприимчивость региона.

Определяя человеческий капитал в качестве одного из важнейших факторов формирования инновационной восприимчивости, прежде всего следует учитывать сложившийся на современном этапе развития ряд тенденций негативного характера. Наиболее значимыми из них являются следующие.

1. Структурный (по профессиям) и абсолютный дефицит кадров. Структурный дефицит обусловлен: преобладанием в подготовке специалистов нетехнических направлений; отсутствием стимулов материальной поддержки выпускников, что, в свою очередь, как следствие, определяет отток перспективной молодежи за рубеж и достаточно высокий возрастной уровень профессионалов.

Абсолютный дефицит кадров складывается под воздействием факторов демографического порядка. В 2005–2010 гг. в России наблюдается падение уровня рождаемости (во многом определяемое социально-экономическими условиями, подменой морально-этических норм в обществе), рост смертности (особенно высокая смертность мужчин в трудоспособном возрасте), повышение удельного веса категории пенсионного возраста в общей совокупности населения. К концу 80-х число людей пенсионного возраста превысило пятую часть от всего населения; при этом отношение числа пенсионеров к числу граждан в трудоспособном возрасте возросло до 1:3. В сравнении с другими странам, соотношение численности возрастных групп 15–64 года и старше 65 лет в России составляет 33,7 %, когда для Бразилии – 7,7 %, Южной Кореи – 9,8 %, Китая – 10 %, США –18 %, Германии – 24,1 %, Великобритании – 24,2 % [8]. Это ведет к уменьшению доли экономически активного населения в общей численности и, соответственно, сокращению потенциала данного ресурса.

2. Недостаточность высококвалифицированных кадров. Данный аспект объединяет несколько компонентов: преобладание в подготовке специалистов нетехнических направлений; отсутствие стимулов материальной поддержки выпускников, что, в свою очередь, как следствие, определяет отток перспективной молодежи за рубеж и достаточно высокий возрастной уровень профессионалов. В 2008 г. удельный вес возрастных групп до 29 лет и 30–39 лет в численности исследователей составил 17,6 % и 14,2 % соответственно, при одновременном увеличении за 8 лет доли исследователей в возрасте 60 лет и старше с 20,8 % до 25,2 % [8].

Низкий уровень инновационного развития в России способствует «утечке мозгов» на Запад. Об этом сообщается в материалах Национальной ассоциации инноваций и развития информационных технологий (НАИРИТ). Только за 2009 г. из России уехало около 6 100 научных специалистов. Эти данные позволяют говорить об очередной активизации процесса «утечки мозгов». Последний раз такое количество ученых покидало страну в 2006 г., когда еще не действовала государственная программа поддержки инновационного развития. В ассоциации полагают, что столь низкая эффективность инновационного развития объясняется некомпетентностью и непрозрачностью работы государственных чиновников, отвечающих за ход федеральных инновационных программ и проектов [17]. Особо остро это проявляется в научно-исследовательской сфере: по числу исследователей на 1000 занятых в экономике Россия уступает более чем двадцати государствам, в том числе Финляндии, Франции, Германии, США, Японии и др.

Для России характерна концентрация высококвалифицированных специалистов в ограниченном числе регионов, что снижает потенциал других регионов. Основными центрами науки в Рос-

сийской Федерации (по показателю численности исследователей) в 2009 г. были: г. Москва (239 477 человек), г. Санкт-Петербург (81 430 человек), Нижегородская область (40 909 человек), Новосибирская область (21 622 человека), Свердловская область (20 390 человек). При этом в Ленинградской области данный показатель составляет 6 463 человека, в Томской области – 8 560 человек, Красноярском крае – 6 299 человек [16]. Таким образом, для России характерно неравномерное распределение исследователей по регионам страны.

3. Состояние образовательной сферы. За последние годы, по данным Минэкономразвития РФ, реализована финансовая поддержка инновационных программ 57 вузов (за период 2005–2008 гг. на эти цели было выделено 30 млрд рублей). Хроническое недофинансирование сферы образования (Россия расходовала на образование в 2007 году 4,0 % ВВП, тогда как Финляндия – 5,9 %, США – 5,3 %, Франция – 5,6%, Бразилия – 5,2 %, Южная Корея – 4,2 %), структурные проблемы, включая устаревшие модели управления учебным процессом, нехватку в системе образования современных кадров, в том числе управленческих, определяют современное состояние образовательной сферы [8].

По подсчетам специалистов, в развитых странах коэффициент выбытия основного капитала составляет 4–4,5 %, а в наиболее быстро развивающихся отраслях хозяйства – от 7 до 9 %. Это означает, что знания специалистов в соответствующих областях устаревают за 7–10 лет, за время жизни одного поколения машин. Каждый новый жизненный цикл производственных инноваций нуждается в радикальных изменениях характера подготовки квалифицированных кадров, особенно в технических вузах, где куется основная масса инженерных кадров. От их квалификации в огромной мере зависит продвижение страны по пути технического прогресса [9].

Существенное влияние оказывает и историческое размещение центров высшего образования. В настоящее время основными центрами (по показателю численности студентов образовательных учреждений высшего образования в 2009–2010 г.) являлись: г. Москва (1 231 человек), г. Санкт-Петербург (988 человек), Томская область (827 человек). Для сравнения: Московская и Ленинградская области занимают по этому показателю только 75-е и 81-е места [16]. Красноярский край занимает 43-е место при 435 студентах на 10 тыс. человек населения. В целом, система образования недостаточно ориентирована на удовлетворение потребностей инновационного развития и экономики в целом.

В настоящее время вопросы развития образования в целом и высшего образования в частности выделены Правительством РФ как основные для формирования в России конкурентоспособной экономики. Комиссия при администрации президента, работающая над программами роста российской экономики, внесла образование в число ведущих приоритетов политики государства. Это является свидетельством достигнутого в обществе и в среде специалистов консенсуса относительно его ведущей роли в определении параметров социально-экономического развития страны. Тем не менее, обеспечение приоритетного развития образования в современной российской экономике требует решения целого комплекса накопившихся проблем, среди которых вопросы повышения качества подготовки специалистов занимают центральное место.

Формирование кадрового потенциала в современных условиях, отвечающего мировым тенденциям экономического развития, является необходимой предпосылкой создания инновационного государства. Это может быть достигнуто за счет непрерывного образования специалиста. Образование является приоритетом в развитии государства и общества, так как оно представляет для страны социальную стабильность, экономический рост и конкурентоспособность.

Как отмечено в Концепции развития российского образования на период до 2010 года, «главная задача российской образовательной политики – обеспечение современного качества образования на основе сохранения его фундаментальности и соответствия актуальным и перспективным потребностям личности, общества и государства» [2]. В свою очередь, высшее образование выступает как фактор формирования нового качества экономики субъектов РФ, в том числе через развитие их инновационной восприимчивости.

Вышеизложенное логически приводит к необходимости раскрытия понятия «качество образования».

Так, согласно неофициальным материалам Министерства образования РФ, данное понятие рассматривается в двух аспектах:

1. Качество результата образовательного процесса: соответствие уровня знаний студентов и выпускников требованиям стандартов.

2. Характеристики системы обеспечения качества, а именно: содержания образования, уровня подготовки абитуриентов, преподавательских кадров, информационно-методического обеспечения, материально-технического обеспечения качества

подготовки, используемых образовательных технологий и научной деятельности.

В других литературных источниках [12] высказывается точка зрения, которая связывает качество подготовки специалистов в вузах с двумя основными составляющими – качество содержания образовательных программ и качество менеджмента в вузе.

В соответствии с требованиями Болонского процесса, согласно критериям «Стандартов и рекомендаций гарантии качества высшего образования в европейском пространстве (ENQA)», обеспечение качества образования достигается через:

«1.4. Обеспечение качества преподавательского состава: учебные заведения должны разработать способы и критерии оценки компетентности преподавателей, обучающих студентов. Данные критерии должны быть доступны организациям, осуществляющим внешнюю оценку, и прокомментированы в отчётах.

1.5. Материальное обеспечение учебного процесса и поддержка студентов: учебные заведения должны гарантировать, что ресурсы, доступные для поддержки обучения студентов, являются адекватными и уместными для каждой предлагаемой программы.

1.6. Система информирования: учебные заведения должны обеспечивать сбор, анализ и использование важной информации для эффективного менеджмента программ обучения и других видов деятельности» [15].

В целом, с позиций международных стандартов ИСО 9001, «качество – степень соответствия совокупности присущих характеристик требованиям» [3]. В данной российской трактовке качества прослеживается ориентация на требования потребителя и других заинтересованных сторон. Данное определение качества может быть применено и к образовательной услуге.

В.П. Засыпкин [7] считает, что понятие «качество образования» должно быть осознано как единый, но сложный феномен, базирующийся на социокультурной основе, т. е. качество образования в этом понимании должно стать потребностью общества, его ценностным ориентиром.

В монографии В.В. Левшиной и Э.С. Буки [11] отмечено, что качество образования, как главный механизм общественного интеллекта, опережающего развитие качества человека, науки и культуры, является одной из основных составляющих качества человека.

Справедливо подчеркивая роль и значение качества образования в приведенных выше двух толкованиях, их авторы не раскрывают, на наш взгляд, его сущностную характеристику.

Наиболее точное определение рассматриваемого понятия, по мнению авторов статьи, приводится д. э. н., проф. Э.М. Коротковым, а также содержится в проекте ФЗ «Об образовании».

В частности, д. э. н., проф. Э. М. Коротков считает, что «...качество образования ... – это комплекс характеристик профессионального сознания, определяющих способность специалиста успешно осуществлять профессиональную деятельность в соответствии с требованиями экономики на современном этапе развития» [10].

В проекте ФЗ «Об образовании» под качеством образования понимается «комплексная характеристика образования, выражающая степень его соответствия федеральным государственным образовательным стандартам и федеральным государственным требованиям (образовательным стандартам и требованиям, устанавливаемым университетами) и (или) потребностям заказчика образовательных услуг, социальным и личностным ожиданиям человека» [14].

Приведенные дефиниции, если их рассматривать как дополнения друг другу, наиболее емко дают понимание сущности качества образования, подчеркивая необходимость его соответствия определенным требованиям государства, а с другой стороны – требованиям и запросам экономики на определенном этапе ее развития.

Принимая во внимание данную позицию в отношении толкования сущности качества образования, подчеркнем, что важным в определении возможностей его повышения является система оценки качества образования.

Согласно «Стандартам и рекомендациям ENQA» при оценке качества образования важное место уделяется проведению мониторинга как «официального механизма … для периодического рецензирования и наблюдения за программами…» [15].

Построение рейтингов, их мониторинг, сравнительная оценка уровня образования могут служить одним из механизмов регулирования и повышения качества образовательных услуг. При этом следует учитывать, что непосредственными участниками процесса повышения качества образования являются вузы.

На сегодняшний день официальным рейтингом вузов страны является рейтинг Министерства образования и науки РФ. На основании приказов Министерства образования РФ ежегодно проводиться рейтинг специальностей и вузов России. В настоящее время участие в рейтинге обязательно для всех аккредитованных высших учебных заведений и их филиалов, которые подразделяются на университеты и вузы: технические, педагогические, экономические, сельскохозяйственные,

права, госслужбы, архитектурные и художественные, медицинские и т. д. В связи с этим стало возможным более объективное сравнение показателей не только отдельных вузов, но и их объединений в различных комбинациях.

Основу рейтинга вузов, согласно Приказу Министерства образования РФ от 19.02.2003 № 593, составляют 19 локальных критериев, которые обобщаются в интегральные и глобальный критерии и определяются по 41 значению исходных данных, характеризующих все основные направления деятельности вузов с точки зрения потенциала вуза и его активности. Критерии отвечают цели системы, определенной как «обеспечение соответствия содержания и качества образования потребностям граждан и комплексу общественно-государственных требований» [1].

Справедливо отметить, что на сегодняшней день методическая основа формирования рейтинга вузов не ограничивается вышеупомянутым Приказом Министерства образования РФ, имеются альтернативные ее варианты, включая зарубежный опыт.

В Германии существует только рейтинг специальностей (или факультетов), разработанный Центром по развитию высшего образования совместно с национальным фондом оценки товаров и услуг, журналом Stern. При этом вуз, занимающий первые места по одной специальности, совсем необязательно будет играть ведущую роль и по другим специальностям – скорее наоборот, что объясняется различиями как в преподавательском составе, так и в подходе к преподаванию различных предметов.

В Китае рейтинги вузов формируются, например, на основе таких показателей, как: репутация вуза, академические и физические ресурсы, результаты исследований, контингент студентов и качество ППС [6].

В международных рейтингах вузов оценивается, как правило, научная активность: цитируемость исследований, признание научных исследований посредством получения премий, а также доступность информации вуза, характеризующаяся числом ссылок на страницы сайта вуза.

В Новосибирском государственном техническом университете с 1998 года применяется рейтинговая система оценки деятельности факультетов, основанная на расчете трех взаимосвязанных и взаимозависимых показателей [13]:

– уровень, качество и результативность научных исследований;

– уровень, качество и результативность обучения;

– интенсивность развития и ресурсообеспечение.

В России составлением рейтингов вузов также занимаются и независимые рейтинговые агентства. Агентство «РейтОР» периодически проводит рейтинг вузов Москвы [18]. Необходимо отметить, что при оценке вузов по данной методике включены критерии, которые не учитываются Минобрнауки России: уровень зарплаты выпускника при устройстве на работу, скорость карьерного роста молодого специалиста, корпоративные умения и навыки и т. д.

Также в сети Интернет на образовательном портале Всевед [19] составляется рейтинг вузов с точки зрения студентов и выпускников, где оценки подлежат учебные программы, профессорско-преподавательский состав, материально-техническое обеспечение, помощь вуза в трудоустройстве и др.

В последнее время получила развитие оценка вузов и образовательных программ, формируемая Независимыми общественными аккредитационными организациями, которые осуществляют общественно-профессиональную экспертизу отдельных образовательных программ. Независимая общественно-профессиональная аккредитация ориентирована главным образом на абитуриентов и их родителей, работодателей и инвесторов, представляя собой «признание обществом значительных достижений образовательного учреждения в подготовке специалистов и проведении научных исследований» [4].

Детальный сравнительный анализ рассмотренных выше и других существующих методик составления рейтинга вузов с целью оценки качества образовательных услуг выходит за рамки данной статьи, но здесь считаем необходимым акцентировать внимание на следующем важном выводе, к которому пришли авторы статьи. Большинство из них используют индивидуальные рейтинги преподавателей, рейтинги кафедр и факультетов, однако при аккредитации вуза лицензированию подлежат не вышеперечисленные объекты, а специальности и (или) направления подготовки. Данное обстоятельство, на наш взгляд, предопределяет важность и необходимость решения вопроса совершенствования методического обеспечения оценки качества образования, а в этой связи оно должно явиться темой и предметом отдельных самостоятельных исследований. Именно данному направлению будут посвящены дальнейшие научные публикации авторов статьи.

Подводя итоги, подчеркнем, что повышение качества образования в рамках отдельных учреждений профессионального образования, бесспорно,

способствует повышению их конкурентоспособности на рынке образовательных услуг, однако главное то, что оно призвано сформировать предпосылки для усиления позитивного влияния человеческого фактора на развитие инновационной восприимчивости регионов и страны в целом, а это, в свою очередь, обусловливает создание условий для повышения конкурентоспособности и устойчивого роста национальной экономики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О внесении изменений в приказ Министерства образования Российской Федерации от 26.02.2001 г. № 631 «О рейтинге высших учебных заведений» : приказ Министерства образования Российской Федерации от 19 февраля 2003 г. № 593 [Электронный ресурс]. – URL : www.lawmix.ru/pprf/40520 (дата обращения 05.06.2011).
2. Концепция модернизации российского образования на период до 2010 года [Электронный ресурс] : приказ Минобразования России от 11.02.2002 № 393. – URL : www.edu.ru/db/mo/Data/d_02/393.html (дата обращения 24.05.2011).
3. ГОСТ Р ИСО 9000-2001 Государственный стандарт Российской Федерации. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Электронный ресурс]. – URL : www.unilib.neva.ru/dl/quality/std/gsriso90002001.html. (дата обращения 20.05.2011).
4. Авраамов Ю. С. Независимая общественно-профессиональная аккредитация: повышение качества и конкурентоспособности российского образования [Электронный ресурс] – URL : www.expertclub.ru/sections/hr/action/13/Nezavisimaya_Obcshestvenno_professionalynaya_akkreditatciya.pdf. (дата обращения 22.04.2011).
5. Владимирова О. Н. Организационно-экономические и институциональные основы формирования и функционирования региональных инновационных систем : моногр. – М. : Доброе слово, 2011. – 266 с.
6. Гончаров Л. П., Пономарев М. А. Разработка методики рейтинга студентов (выпускников) вуза как средства стимулирования сотрудничества вузов и коммерческих организаций // Экономический анализ: теория и практика. – 2009. – № 3 (132). – С. 8–14.
7. Засыпкин В. П. Научно-исследовательская деятельность кафедры, педагогического вуза качество, управление, оценка // Университетское управление: практика и анализ. – 2006. – № 1 (41). – С. 49–57.
8. Инновационная Россия – 2020. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года: проект Минэкономразвития [Электронный ресурс]. – URL : http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/innovations/doc20101231_016. (дата обращения 22.04.2011.
9. Квасов И. Н., Пивоварова А. В. Анализ инновационного потенциала региона // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2011. – № 1 (43). – С. 26–31.
10. Коротков Э. М. Система комплексной оценки качества образования специалиста // Высш. образование в России. – 1995. – № 2. – С. 72–78.
11. Левшина В. В., Бука Э. С. Формирование системы менеджмента качества вуза: моногр. – Красноярск : СибГТУ, 2004. – 328 с.
12. Похолкова Ю. П., Чучалина А. И. Менеджмент качества в вузе. – Томск : Изд-во ТПУ, 2004. – 252 с.
13. Никитина Н. Ш. Рейтинговая оценка деятельности факультетов как элемент системы мониторинга качества образования в университете // Университетское управление практика и анализ. – 2003. – № 4 (27). – С. 62–70.
14. Проект федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» (на 1 декабря 2010 года) [Электронный ресурс]. – URL : zakonoproekt2011.ru/edu/01-12-2010 – (Дата обращения 22.04.2011).
15. Стандарты и рекомендации для гарантии качества высшего образования в европейском пространстве. – Йошкар-Ола : Аккредитация в образовании, 2008. – 58 с.
16. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2009 : стат. сб. – М. : Росстат, 2009. – 991 с.
17. Российские «мозги» снова хлынули за рубеж [Электронный ресурс]. – URL : http://www.infox.ru/business/company/2010/03/19/_Utyechka_mozgov_print.phtml (дата обращения 22.04.2011).
18. Официальный сайт «Независимого рейтингового агентства в сфере образования «РейтОР» [Электронный ресурс]. – URL : www.reitor.ru. (дата обращения 16.02.2011).
19. Образование. ВУЗы Москвы и России. Рейтинг ВУЗов, школы, новости образования, статьи, курсы [Электронный ресурс] офиц. сайт «ВСЕВЕД». – М., 2011. – URL : www.ed.vseved.ru. (дата обращения 09.09.2011).

УДК 66.061.35; 66.021.3

Ситников Денис Николаевич,
аспирант кафедры химической технологии
Иркутского государственного технического университета,
тел. 8 (3955) 51-29-03, e-mail: denissit_85@mail.ru
Ульянов Борис Александрович,
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии топлива
Ангарской государственной технической академии, тел. 8 (3955) 51-29-03
Семёнов Иван Александрович,
канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии топлива
Ангарской государственной технической академии,
тел.: 8 (3955) 56-67-89; e-mail: semenov_ia82@mail.ru
Фереферов Михаил Юрьевич,
канд. техн. наук, доцент кафедры химической технологии топлива
Ангарской государственной технической академии. Тел. 8 (3955) 51-29-03
Романовский Андрей Александрович,
аспирант кафедры химической технологии топлива
Ангарской государственной технической академии,
тел.: 8 (3955) 56-67-89; e-mail: Zyljin@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООБМЕНА В ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЕ ПРИ ЭКСТРАКЦИИ МЕТАНОЛА ВОДОЙ ИЗ СМЕСИ ЕГО С ГЕКСАНОМ

D.N. Sitnikov, B.A. Ulyanov, I.A. Semenov, M.U. Fereferov, A.A. Romanovsky

MASS TRANSFER FROM DISPERSE PHASE MODELING IN THE METHANOL EXTRACTION FROM HEXANE BY WATER

Аннотация. *Выполнена оценка концевых эффектов при массопередаче в дисперсной фазе. Рассмотрена применимость моделей массопередачи внутри капли. Расчетные значения, полученные с помощью моделей, сопоставлены с экспериментальными данными.*

Ключевые слова: *экстракция, массообмен.*

Abstract. *The end-effect of mass transfer in disperse phase has been estimated. The applicability of various models for transfer inside drops has been examined. The values predicted by models have been compared with experimental data.*

Keywords: *extraction, mass transfer.*

В процессе экстракции распределяемый компонент переходит из одной фазы в другую, пересекая границу раздела фаз. Если обозначить массовую долю его в отдающей фазе $\bar{y}$, а на границе раздела $\bar{y}_{ГР}$, то можно написать уравнение массоотдачи, определяющее поток компонента dM [кг/с] в отдающей фазе:

$$dM = \beta_y \rho_y dF d\tau \left(\bar{y} - \bar{y}_{ГР}\right), \qquad (1)$$

где ρ_y – плотность отдающей фазы, [кг/м^3]; dF – поверхность контакта, [м^2]; $d\tau$ – время контакта, [с]; β_y – коэффициент массоотдачи, [м/с].

Аналогичное уравнение можно написать и для принимающей фазы, в которой массовая доля компонента на границе раздела $\bar{x}_{ГР}$, а в основной массе $\bar{x}$:

$$dM = \beta_x \rho_x dF d\tau \left(\bar{x}_{ГР} - \bar{x}\right), \qquad (2)$$

где ρ_x – плотность принимающей фазы, [кг/м^3]; β_x – коэффициент массоотдачи в принимающей фазе, [м/с].

При стационарном режиме количество компонента, переносимое в каждой фазе, одинаково:

$$\beta_y \rho_y dF d\tau \left(\bar{y} - \bar{y}_{ГР}\right) = \beta_x \rho_x dF d\tau \left(\bar{x}_{ГР} - \bar{x}\right). \qquad (3)$$

Обычно на границе раздела фаз принимается состояние равновесия и граничные концентрации связаны между собой простым соотношением [1]:

$$\bar{y}_{ГР} = m \bar{x}_{ГР}, \qquad (4)$$

где m – константа фазового равновесия.

Совместное решение уравнений (3) и (4) позволяет исключить граничные концентрации и выразить поток компонента следующим уравнением:

$$dM = \frac{1}{\left(\frac{1}{\rho_y \beta_y} + \frac{m}{\rho_x \beta_x}\right)} dFd\tau\left(\bar{y} - \bar{y}^*\right), \qquad (5)$$

где $\bar{y}^*$ – концентрация компонента в отдающей фазе, равновесная концентрации $\bar{x}$ в принимающей фазе.

Исследования фазового равновесия смеси метанол – вода – гексан при 20 °С позволили получить зависимость, связывающую мольные доли метанола в органической y^* и водной x фазах [2]:

$$y^* = x \cdot \exp\left(4{,}8282 x^{2{,}2821} - 5{,}4311\right). \qquad (6)$$

На рис. 1 представлена равновесная зависимость, выраженная в массовых долях метанола. Значения константы фазового равновесия m в зависимости от концентрации метанола в органической фазе представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение константы фазового равновесия

$\bar{y}^*$	m
0,001	0,002
0,002	0,0032
0,005	0,0068
0,010	0,012
0,020	0,023
0,030	0,034

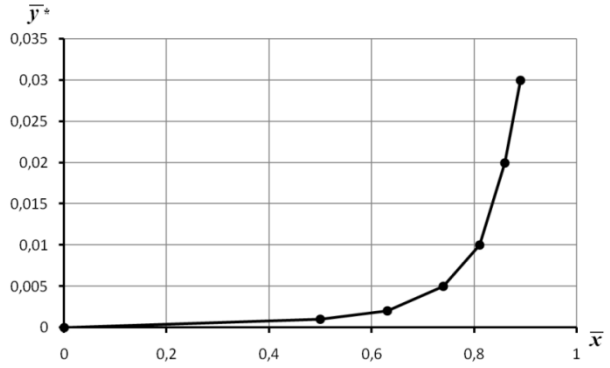


Рис. 1. Равновесные концентрации метанола в водной $\bar{x}$ и органической $\bar{y}^*$ фазах при температуре 20 °С

Из табл. 1 следует, что при содержании метанола в органической фазе до 3 % масс, константа m имеет низкие значения, что обуславливает малую величину второго слагаемого в (5) по сравнению с первым. Это позволяет сделать вывод, что в рассматриваемых условиях сопротивление массообмену практически полностью сосредоточено на стороне органической фазы. Уравнение (5) в этом случае можно представить в следующем виде:

$$dM = \beta_y \rho_y dFd\tau\left(\bar{y} - \bar{y}^*\right). \qquad (7)$$

Располагая равновесной зависимостью и измерив в опытах поток компонента, можно с помощью ур. (7) определить коэффициенты массоотдачи в органической фазе.

Нами были выполнены опыты по экстракции метанола из одиночных капель гексана, всплывающих в воде. Физико-химические свойства взаимодействующих фаз приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические свойства сплошной и дисперсной фаз при температуре t = 20 °С

№ п/п	Наименование свойства, обозначение и размерность	Фазы	
		Сплошная (С)	Дисперсная (Д)
1	Плотность, ρ, [кг/м^3]	1000	663
2	Вязкость, μ, [Па с]	$1 \cdot 10^{-3}$	$0{,}33 \cdot 10^{-3}$
3	Поверхностное натяжение, σ, [Н/м]	0,0720	0,0185
4	Коэффициент диффузии метанола, D, [м^2/с]	$1{,}63 \cdot 10^{-9}$	$6{,}92 \cdot 10^{-9}$

Экспериментальная установка включала в себя полую экстракционную колонку, оборудованную системой регулируемой подачи дисперсной фазы и системой отбора проб (рис. 2).

Колонка была выполнена из стеклянной трубы 1 внутренним диаметром 50 мм, накидного фланца 2, изготовленного из органического стекла, фторопластового кольца 3 и днища 4. Для удобства отбора проб высота рабочей части колонки регулировалась путем установки труб разной длины и составляла 0,14; 0,26; 0,5; 1,0; 1,5 м. В кольцо 3 были встроены кран 5, предназначенный для опорожнения колонки, и регулирующий клапан 6 для подачи дисперсной фазы. Для непрерывного контроля температуры рабочей среды через отверстие в кольце была введена термопара 7, соединенная с измерительным преобразователем модели РЭТ-300.

Система подачи дисперсной фазы состояла из компрессора 8 со встроенным ресивером, напорной емкости 9 объемом 200 см^3, подводящей металлической трубки 10 и выполненного из стекла сопла 11. Ресивер компрессора был соединен через редуктор шлангом с напорной емкостью и обеспечивал поддержание в ней постоянного избыточного давления, достаточного для равномерной подачи жидкости в колонку. Напорная емкость 9 была выполнена в виде стеклянной бюретки со шкалой, позволяющей измерять объемный расход дисперсной фазы. Для контроля избыточного давления в верхней части бюретки был установлен манометр 12. Формирование капель осуществлялось с помощью прямоточного электромагнитного клапана 6. Блок управления 13 позволял регулировать в широком диапазоне проходное сечение и интервал открытия запирающего механизма.

Объем капли V_K, [м^3], определялся исходя из частоты образования капель n, [1/с], и секундного расхода дисперсной фазы, который измерялся с помощью бюретки 11. Было установлено, что для исследованных режимов объем образующихся капель мало зависел от скорости истечения и в основном определялся диаметром отверстия сопла.

С помощью видеокамеры, расположенной на подъемном устройстве, фиксировалась форма капель, а также скорость их всплывания.

После отрыва от отверстия капля принимала форму сплющенного сфероида с размерами большой полуоси a и малой полуоси b. Соотношение их определялось эмпирической формулой [3]:

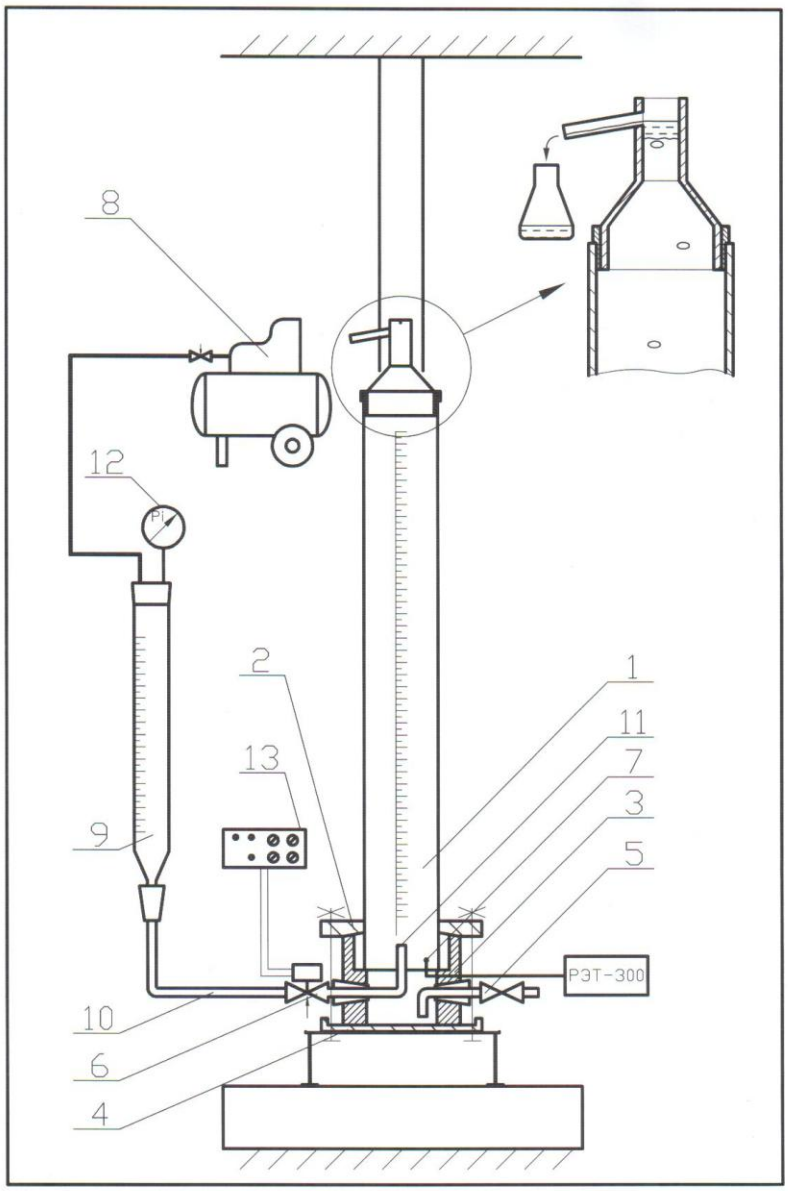


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

$$\frac{a}{b}=1+0,091\left(dw^2\rho_C/\sigma\right)^{0,95}, \quad (8)$$

где w – скорость движения капли, [м/с]; d – диаметр равновеликой сферы, [м].

Истинные значения a и b находились путем совместного решения ур. (8) и уравнения, определяющего объем сфероида:

$$V_K=\frac{4}{3}\pi a^2 b. \quad (9)$$

Поверхность капли рассчитывалась по уравнению

$$F_K=2\pi d\left(a+\frac{b^2}{\sqrt{a^2-b^2}}\ln\left(\frac{a+\sqrt{a^2-b^2}}{b}\right)\right). \quad (10)$$

Было установлено, что скорость всплывания капель после отрыва их от сопла быстро достигала своего предельного значения и составляла ~ 0,16 [м/с].

Система отбора проб состояла из камеры улавливания капель, имеющей форму усеченного конуса (рис. 3). Основание конуса соответствовало внутреннему диаметру колонки, а вершина – диаметру переливной трубки. Уровень раздела водной и органической фаз располагался в средней части переливной трубки. Это обеспечивало сравнительно малую поверхность раздела фаз и, как следствие, уменьшение концевого эффекта, связанного с разрушением капель на выходе из слоя. Вследствие большого различия плотностей воды и гексана наблюдалось быстрое расслоение фаз. Отстоявшаяся легкая фаза стекала по наклонной трубке в сборник рафината. При установившемся режиме из потока с промежутками в 2 минуты отбирались три параллельных пробы для хроматографического анализа.

Анализ проб выполнялся на хроматографе модели «Цвет-200» методом внутреннего стандарта. В качестве стандарта был выбран метанол. Поправочные коэффициенты для воды и гексана рассчитывались путем хроматографии стандартной смеси известного состава.

На рис. 3 представлена схема процесса экстракции из одиночных капель, поднимающихся в слое жидкости. При этом можно выделить три стадии, отличающиеся гидродинамическими условиями и интенсивностью массопередачи:

- стадия формирования капли;
- стадия установившегося движения капли;
- стадия коалесценции при выходе капли из тяжелой фазы.

Наиболее изученной из них следует считать стадию установившегося движения капли. Механизмы переноса вещества при подъеме или падении капель в установившемся режиме исследованы для множества случаев [4, 5], получены эмпирические зависимости для расчета скорости массообмена и разработаны модели массопередачи.

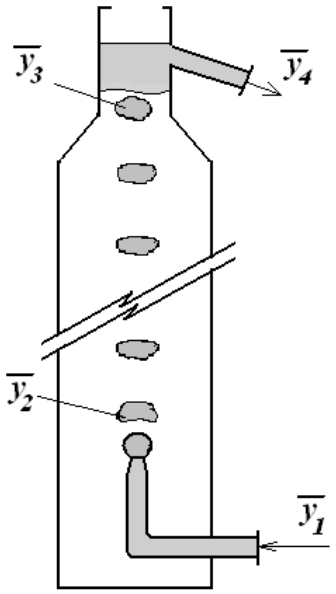


Рис. 3. Концентрации извлекаемого компонента в характерных точках системы

Для мелких капель, ведущих себя подобно «жестким сферам», внутри которых массоперенос осуществляется лишь за счет молекулярной диффузии, коэффициенты массоотдачи можно рассчитать по уравнению Ньюмена [6]:

$$\beta_Д=-\frac{d}{6\tau}\ln\left\{1-\left[1-\exp\left(-\pi^2 4D_Д\,\tau/d^2\right)\right]^{0,5}\right\}, \quad (11)$$

где τ – время пребывания капель в колонне.

При расчете массопередачи в режиме ламинарной циркуляции обычно используется уравнение Кронига – Бринка, основанное на общем представлении Адамара – Рыбчинского о линиях тока [7]:

$$Sh_Д=\frac{1}{6Fo}\left\{1-0,6534\exp\left(-107,4Fo\right)-0,2\exp\left(-629Fo\right)\right\}. \quad (12)$$

Число Фурье включает в себя в качестве характерного размера радиус равновеликой сферы R:

$$Fo=D_Д\,\tau/R^2. \quad (13)$$

Ограничения применимости модели Кронига – Бринка связано с возрастанием скорости капель до таких величин, когда капли отклоняются от сферической формы и линеаризация уравнений Навье – Стокса становится недопустимой. Установить теоретическим путем верхний предел применимости модели Кронига – Бринка в настоящее время не представляется возможным, и это может быть сделано только путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными.

Наибольшую эффективность массоотдачи можно ожидать в том случае, если внутри капли возникает турбулентность и происходит макроскопический перенос вещества. Это учитывает модель Хандлоса – Барона [8], в которой предполагается, что за время одного циркуляционного оборота внутри капли происходит полное перемешивание жидкости. Среднее время циркуляции $\tau_Ц$, равное времени перемешивания, определяется исходя из циркуляционной модели Кронига – Бринка:

$$\tau_Ц = \frac{32R}{3w}\left(1+\frac{\mu_Д}{\mu_C}\right), \qquad (14)$$

Согласно модели Хандлоса – Барона, коэффициент массоотдачи в каплях может быть рассчитан по уравнению

$$\beta_Д = \frac{0,00375w}{1+\mu_Д/\mu_C}. \qquad (15)$$

В период каплеобразования поверхность формируется мгновенно, и диффузия носит нестационарный характер. В этих условиях можно пренебречь конвективной составляющей и записать уравнение нестационарной диффузии в следующем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \qquad (16)$$

Решение этого уравнения было получено Хигби [9] и имеет следующий вид:

$$\beta_Д = 2\sqrt{D_Д/\pi\tau}, \qquad (17)$$

где $\beta_Д$ – коэффициент массоотдачи в дисперсной фазе, [м/с].

Наблюдения за процессом коалесценции капель показали, что при достижении границы раздела фаз капли останавливаются и некоторое время сохраняют свою индивидуальность. После этого они растекаются по всей горизонтальной поверхности. Такое поведение капель объясняется различием поверхностного натяжения воды и гексана. По-видимому, между осевшей каплей и слоем отстоявшейся легкой фазы сохраняется пленка воды с большим поверхностным натяжением, которая препятствует слиянию капли. По мере вытеснения этой пленки капля гексана распределяется по поверхности, образуя слой легкой фазы. В таком слое протекает нестационарный процесс массообмена до тех пор, пока следующая капля не достигнет границы раздела. Каплеобразование и коалесценция капель представляют собой так называемые концевые эффекты, которые оказывают влияние на общую эффективность процесса экстракции.

В табл. 3 приведены данные по экстракции метанола из одиночных капель гексана, всплывающих в слое воды. Видно, что размеры капель d и скорости их движения w во всех опытах были примерно одинаковыми. Вследствие этого близкими оказались и числа Рейнольдса, свидетельствующие об идентичности гидродинамических режимов.

Начальная концентрация метанола в гексане во всех опытах была постоянной и составляла $\bar{y}_1 = 0,04$ масс. доли. Значения концентраций метанола на выходе из колонны $\bar{y}_4$, указанные в табл. 3, являются средними величинами из 3–6 результатов анализа.

В каждом из опытов использовалась чистая дистиллированная вода, и насыщение её метанолом в процессе эксперимента было ничтожным. Поэтому можно считать, что равновесная концентрация в ур. (7) $y^* = 0$ и средняя логарифмическая движущая сила процесса определяется уравнением:

$$\Delta\bar{y}_{СР} = \left(\bar{y}_1 - \bar{y}_4\right)\Big/\ln\left(\bar{y}_1/\bar{y}_4\right). \qquad (18)$$

Тогда общее число единиц переноса, представляющее собой отношение изменения концентрации $\left(\bar{y}_1 - \bar{y}_4\right)$ к средней движущей силе процесса, можно представить следующим выражением:

$$n_y = \ln\left(\bar{y}_1/\bar{y}_4\right). \qquad (19)$$

Так как опыты проводились при разных вы-

Таблица 3

Измеренные и рассчитанные параметры процесса экстракции метанола водой из одиночных капель в смеси его с гексаном при температуре 20 °С (диаметр отверстия $d_0 = 0,003$ м)

№ п/п	H, м	w, м/с	$d\cdot10^3$, м	$\bar{y}_4$, масс. дол.	Re	n_y	$n_{ПР}$	$\beta_Д\cdot10^4$, м/с	$Fo\cdot10^5$	E_2
1	0,14	0,161	6,75	0,0185	1087	0,77	5,5	1,85	60	0,13
2	0,26	0,162	6,70	0,0145	1085	1,01	3,88	1,90	100	0,23
3	0,55	0,165	6,72	0,0085	1109	1,55	2,82	1,86	212	0,43
4	1,05	0,166	6,73	0,0034	1118	2,47	2,35	1,83	404	0,66
5	1,53	0,168	6,68	0,0013	1142	3,43	2,24	1,87	589	0,79

сотах слоя, целесообразно привести числа единиц переноса к единой высоте, равной одному метру:

$$n_{ПР} = n_У / H . \qquad (20)$$

В приведенных значениях чисел единиц переноса некоторая доля приходится на концевые эффекты $n_Э$, а оставшаяся часть – на массообмен при движении капель в слое высотой один метр, n_1.

Поскольку размеры капель, скорость их всплывания и режимы движения мало изменялись от опыта к опыту, можно предположить, что величина n_1 для каждого из них оставалась постоянной. В этом случае для каждого опыта оказывается справедливым следующее соотношение:

$$n_У / H = n_Э / H + n_1 . \qquad (21)$$

Решение уравнения (21) для всей совокупности опытных значений позволяет оценить долю концевых эффектов $n_Э$ в общем числе единиц переноса и число единиц переноса n_1, приходящееся на один метр слоя. Попарное решение ур. (21) показало, что величина n_1 изменяется в пределах от 1,87 до 2,03, а $n_Э$ – от 0,492 до 0,522.

Средние значения их, соответственно, равны $n_1 = 1{,}925$ [1/м] и $n_Э = 0{,}503$ [1/м].

Таким образом, при высоте слоя воды, равной 1 м, доля концевых эффектов в общем массообмена составляет ~ 20 %. Эта величина уменьшается с ростом высоты слоя и, например, в колонне с H = 3 м составляет ~ 8 %.

Для периода стационарного движения капли можно написать следующее уравнение материального баланса:

$$\beta_Д \rho_Д F_K \tau \Delta \bar{y}_{СР} = V_K \rho_Д \left(\bar{y}_2 - \bar{y}_3 \right). \qquad (22)$$

Определяя время контакта τ как отношение высоты слоя H к скорости движения капли w и используя соотношения для чисел единиц переноса, ур. (19–21), можно из ур. (12) выразить коэффициент массоотдачи в дисперсной фазе:

$$\beta_Д = \frac{\left(n_У - n_Э\right) w}{H} \cdot \frac{V_K}{F_K} . \qquad (23)$$

Поверхность деформированной капли F_K рассчитывалась по ур. (10), а объем V_K определялся исходя из диаметра d равновеликой сферы. Вычисленные значения коэффициентов массоотдачи для всех исследованных режимов приведены в табл. 2. Видно, что коэффициенты массоотдачи в период установившегося движения капель при разных высотах слоя имеют близкие значения.

Для случая массообмена, когда сопротивление полностью сосредоточено в дисперсной фазе и равновесная концентрация $\bar{y}^*$ остается величиной постоянной, получено [10] простое соотношение, связывающее коэффициент массоотдачи со степенью извлечения компонента:

$$\beta_Д = -\frac{R}{3\tau} \ln\left[1 - E_2\right], \qquad (24)$$

откуда степень извлечения в основной стадии установившегося движения капли определяется как:

$$E_2 = 1 - e^{-\frac{3H\beta_Д}{wR}} . \qquad (25)$$

Вычисленные значения E_2 приведены в табл. 2 и на рис. 4. Представляло интерес сопоставить их с расчетом по имеющимся моделям.

Степень извлечения компонента в моделях Ньюмена и Кронига – Бринка определяется числом Фурье (ур. 11 и 12). Эти уравнения справедливы, соответственно, для чисто молекулярной диффузии и случая ламинарной циркуляции жид-

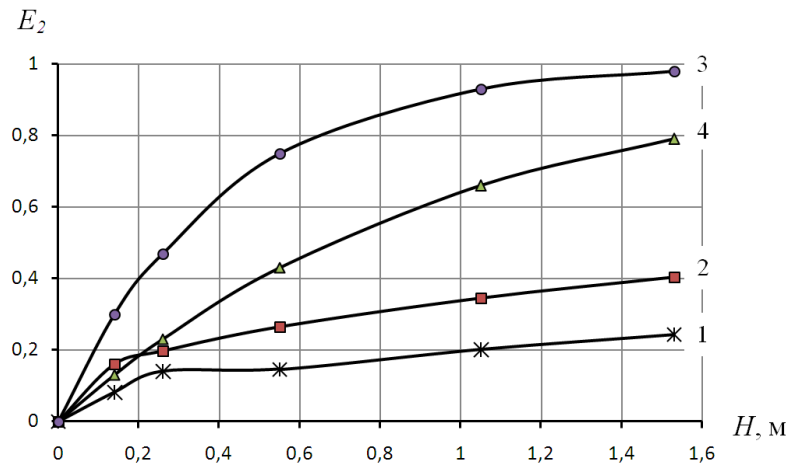


Рис. 4. Результаты расчета зависимости степени извлечения метанола из капель от высоты слоя воды: 1 – по модели Ньюмена; 2 – по модели Кронига – Бринка; 3 – по модели Хандлоса – Барона; 4 – данные эксперимента

кости в каплях. В наших экспериментах капли были деформированными и осциллирующими. Движение их имело турбулентный характер. Поэтому вполне объяснимо, что указанные модели дают заниженные значения степени извлечения.

Для оценки применимости модели Хандлоса и Барона были использованы ур. (15) и ур. (25). Результаты расчета представлены на рис. 4.

Видно, что расчет по модели Хандлоса – Барона дает завышенное значение степени извлечения метанола. Сопоставление результатов расчета и эксперимента свидетельствует о том, что в каплях имеет место микроскопический перенос вещества. Однако турбулентность была развита не в полной мере и реальное описание процесса располагается между этими крайними моделями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М. : Химия, 1971. – 784 с.
2. Семёнов И. А., Ситников Д. Н., Ферефёров М. Ю. Равновесие в системах, состоящих из метанола, воды и парафиновых углеводородов нормального строения // Вестн. АГТА. – 2009. – Т. 3. – С. 50–55.
3. Wellek R. M., Agrawal A. K., Skelland A. H. P., A. I. // Ch. E. Journ. – 1966. – V. 12. – P. 854.
4. Броунштейн Б. И., Железняк А. С. Физико-химические основы жидкостной экстракции. – М. ; Л. : Химия, 1966. – 315 с.
5. Ягодин Г. А., Каган С. З., Тарасов В. В. Основы жидкостной экстракции. – М. : Химия, 1981. – 400 с.
6. Newman A. B. Trans. Am. Inst. // Chem. Engrs. – 1931. – V. 27. – P. 203.
7. Kronig R., Brink J. C. Appl. Sci. // Rec. – 1950. – V.2. – P. 142.
8. Handlos A. E., Baron T. A. I. // Ch. E. Journal. – 1957. – V. 3. – P. 127.
9. Higbie R. Trans. Am. Inst. // Chem. Engrs., 1935. – V. 36. – P. 365–389.
10. Geddes R. Trans. Inst. Am. // Chem. Eng. – 1946. – V. 42. – P. 79.

УДК 51-7

Лоскутова Евгения Васильевна,
старший преподаватель кафедры «Финансы и антикризисное регулирование» ИрГУПС

ЗАДАЧА ФОРМАЛИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

E.V. Loskutova

PROBLEM OF FORMALIZATION AND MODELLING OF EDUCATIONAL PROCESS

Аннотация. *В статье исследуется вопрос повышения эффективности процесса обучения за счет внедрения наукоемких способов представления информации. Рассматривается возможность разработки новых методов и средств систематизации содержания обучения. Выделена структурная схема и диаграмма ориентированного графа системы обучения.*

Ключевые слова: *системный анализ, учебный процесс.*

Abstract. *Question of training process efficiency increase at the expense of introduction of high technology ways of informational representation is investigated in this article. Possibility of working out of new methods and means of ordering of the training maintenance is considered. The block diagram and the diagram of the focused system graph of training are allocated.*

Keywords: *system analysis, educational process.*

Происходящие уже 20 лет в Российской Федерации реформы затрагивают все стороны политической и экономической жизни государства. Данное утверждение относится, в том числе, к процессу подготовки новых специалистов. В рамках происходящих изменений особое внимание уделяется инновационным подходам и методам, позволяющим повысить эффективность использования имеющихся средств обучения в условиях ограниченности материальных ресурсов.

Современное состояние процесса подготовки будущих специалистов экономического профиля свидетельствует о наличии принципиального противоречия между декларируемой в руководящих документах необходимостью подготовки высококвалифицированных кадров страны и недостаточностью во многих высших учебных заведениях качественных материальных и человеческих ресурсов.

Кроме того, обеспечение должного уровня подготовки сегодня сопряжено с возрастающими

трудностями, характеризующимися как усиление объективных противоречий:

- между необходимостью обеспечения страны высокопрофессиональными кадрами и реальным снижением мотивационной направленности у студентов вузов;

- между постоянно повышающимися требованиями к уровню подготовленности специалистов и недостатком необходимых материальных средств на организацию учебного процессам;

- между высоким уровнем интеллектуальной нагрузки, необходимостью освоения значительного объема учебного материала и отсутствием необходимых навыков умственной и практической деятельности, в том числе навыков абстрактного и логического мышления, конспектирования и т. д.;

- между традиционными групповыми нормами обучения, принятыми в вузе, и необходимостью индивидуального подхода к студентам, недостаточно полно усваивающим содержание обучения.

Таким образом, перед руководителем учебного заведения, перед организаторами учебного процесса встает принципиальный вопрос: как в конкретных условиях реально обеспечить подготовку специалистов уровня, определенного требованиями государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования.

Вышеобозначенные противоречия в исходных положениях процесса обучения позволяют утверждать, что в настоящее время назрела необходимость кардинального повышения эффективности обучения за счет использования дополнительных резервов. Таким резервом может стать внедрение в практику процесса подготовки специалистов новых методов и средств систематизации содержания предметных областей обучения, что дает возможность повысить эффективность процесса обучения за счет внедрения наукоемких способов представления обучающего материала.

Повышение требований к уровню подготовки выпускников, необходимость максимально эффективно расходовать объем учебного времени на организацию и обеспечение учебного процесса, непосредственное влияние качества и состояния представления содержания обучения на эффективность теоретической и практической подготовки специалистов, необходимость совершенствования процесса управления образовательным процессом в современных условиях определяют актуальность проводимого исследования.

Обучение – сложный, динамический процесс, имеющий многоуровневую структуру, поэтому закономерным является использование подхода, при котором процесс обучения представляется как система. Обзор различных трактовок понятия системы, сделанный в [3, 4], позволяет сделать вывод, что объект (или процесс) может быть классифицирован как система, если проявляет, по меньшей мере, четыре свойства:

- целостность и членимость;
- связность;
- структурированность;
- интегрированность.

Помимо определенных выше четырех основных свойств объекта (процесса), позволяющих определить его как систему, выделяют ряд закономерностей, которые характеризуют систему как целое:

- коммуникативность (единство со средой существования);
- иерархичность;
- эквифинальность (способность открытых систем, в отличие от состояния равновесия в закрытых системах, полностью детерминированных начальными условиями, достигать не зависящего от времени и начальных условий состояния, которое определяется только параметрами системы);
- закон необходимого разнообразия (для того, чтобы справиться с проблемой, характеризующейся определенным разнообразием, необходимо создать систему с заведомо большим разнообразием);
- закономерность осуществимости и потенциальной эффективности систем (граница эффективности системы определяется свойствами составляющих ее элементов и принятыми правилами их взаимодействия);
- закономерности целеобразования.

Процесс обучения представляет собой взаимодействие двух субъектов: «обучающего» и «обучающегося». Термин «обучающийся» здесь используется как наиболее адекватно отражающий сущность анализируемого процесса. Рассмотрим, исходя из положений системотехники, определенных выше, возможность классификации взаимодействия «обучающий» – «обучающийся» как системы.

Оба этих субъекта до начала взаимодействия обладают определенными системозначимыми свойствами.

«Обучающий» обладает:

- определенной базой знаний, умений и навыков в какой-то научной дисциплине;
- определенной совокупностью знаний, умений и навыков в педагогике.

«Обучающийся» обладает:

- познавательными способностями и потребностями;
- некоторой суммой знаний, умений и навыков, позволяющей начать процесс освоения определенной научной дисциплины.

В результате объединения обучающего и обучающегося в систему оба эти элемента вступают во взаимодействие и между ними устанавли-

ваются устойчивые связи. Причем первичными признаками целостности системы, которая рождается в результате подобного взаимодействия, становятся предварительно определенные цели освоения учебного объекта (УО), а также объем и структура содержания последнего.

В современной литературе наряду с учебным объектом в качестве понятия, определяющего компоненты содержания обучения, используется учебный элемент (УЭ). Термин УЭ впервые предложил В.П. Беспалько [1, 2].

В [2] под термином УЭ понимаются «те объективные явления и предметы окружающего мира, методы и способы их использования в деятельности людей, которые отобраны из науки и внесены в программу учебного предмета для их изучения».

Такое определение УЭ вполне отвечает требованиям процесса формирования программы или тематического плана учебной дисциплины, но оно не соответствует требованиям системного подхода к анализу процесса обучения, т. к. не отражает целей взаимодействия обучающего и обучающегося в рамках данного процесса. Поэтому в [6] предлагаются следующие формулировки:

Учебный элемент – «информационный продукт, представляющий собой отображение логически завершенного элемента содержания программы обучения в соответствии с целями его изучения» [6, с. 43].

Учебный объект – «информационный продукт, отображающий те стороны структуры или функционирования УЭ, на которые направлено конкретное обучающее воздействие» [6, с. 43].

Таким образом, УО есть представление УЭ в конкретной дидактической ситуации.

На основе принятых исходных представлений об обучении [6, с. 28–35] рассмотрим соответствующую данному процессу структурную схему (рис. 1), а также ориентированный граф, отражающий отношения между элементами в структуре (рис. 2).

Проблеме формирования системы и правомерности включения в ее состав тех или иных объектов в качестве элементов посвящено достаточно ограниченное количество работ, что не соответствует уровню ее значимости для процесса обучения.

Рис. 1. Структурная схема системы обучения

При анализе приведенной на рис. 1 структурной схемы системы обучения используем подход В.И. Николаева [5], который позволяет рассматривать любые типы систем. В предложенном подходе способность объекта устанавливать связи принято называть контактной способностью, потенциально возможную связь – контактом, совокупность контактов – разъемом. Возникновение связи в процессе рождения системы рассматривается как соединение контактов, совокупность связей – как соединение, число контактов в разъеме или число связей в соединении как валентность разъема (соединения).

По признаку потенциальных возможностей объекта «генерировать» или «поглощать» связи различаются следующие типы контактов:

а) активные (А), формирующие исходящую связь;

б) пассивные (П), поглощающие входящую связь;

в) нейтральные (Н), способные как формировать, так и поглощать связи.

В [5] обоснована следующая система правил формального описания системы:

- каждый контакт может быть соединен лишь с одним контактом;
- объединение активного контакта с пассивным (нейтральным) приводит к формированию связи, направленной от первого ко второму;
- при объединении нейтрального контакта с пассивным нейтральный контакт подобен активному;
- при объединении двух активных контактов направление связи устанавливается от контакта с большей мощностью к контакту с меньшей мощностью;
- объединение пассивных и нейтральных контактов невозможно.

В приведенной системе правил опущены аналитические оценки мощности контактов и связей, так как сегодня не существует каких-либо обобщенных количественных характеристик деятельности «обучающегося» и «обучающего».

Соединение при наличии соответствующих контактов в элементах происходит при нормировании системы в результате действия соответствующего оператора:

- оператора последовательного соединения;
- оператора разветвления (фокусировки);
- оператора замыкания.

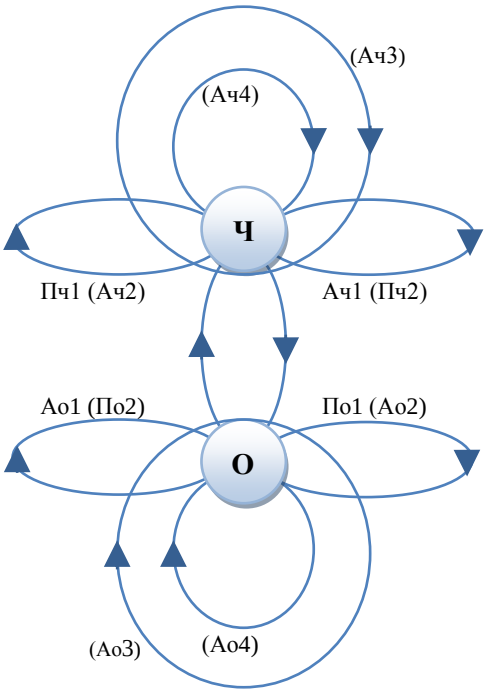


Рис. 2. Диаграмма ориентированного графа системы обучения

Контактная способность «обучающего» в соответствии с исходными представлениями об обучении [6, с. 28–35] определяется следующими способностями:

1) представить обучающемуся УО в необходимом для его усвоения виде (внешний активный контакт Ач1, внутренний пассивный контакт Пч2);

2) оценить процесс и результаты выполнения учебной задачи обучающимся, степень усвоения им УО (внешний пассивный контакт Пч1, внутренний активный контакт Ач2);

3) формулировать дидактическую задачу на основании данных о ходе усвоения УО обучающимся (внутренний активный контакт Ач3);

4) определить в результате решения дидактической задачи необходимый вид обучающего воздействия и применить его для преобразования УО (внутренний активный контакт Ач4).

Контактная способность «обучающегося» определяется:

1) способностью воспринять УО в представленном виде (внешний пассивный контакт По1, внутренний активный контакт Ао2);

2) способностью представить результаты манипулирования УО (результаты выполнения учебной задачи) обучающему (внешний активный контакт Ао1, внутренний пассивный контакт По2);

3) способностью смыслового анализа воспринятого УО (учебной задачи) и выработки способа его преобразования (определение алгоритма решения учебной задачи с последующей его реализацией) (внутренний активный контакт Ао3);

4) способностью усвоения выработанного метода преобразования УО (алгоритма решения учебной задачи как стандартного в аналогичной ситуации) (внутренний активный контакт Ао4).

Так, структурная схема и диаграмма ориентированного графа системы обучения (рис. 2), сформированные эмпирическим путем на основании анализа исходных представлений об обучении, определенным в [6, с. 28–35], отвечают всем требованиям, предъявляемым к формированию системы.

В результате инициализации связей в системе возникает вполне определенная ее организация в виде структуры, а также происходит трансформация системоопределенных свойств элементов в их функции.

Таким образом, опираясь на приведенные выше положения системотехники и работу В.И. Николаева [5], можно сделать вывод о том, что процесс обучения правомерно рассматривать как систему и применять для его исследования соответствующие научные методы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспалько В. П. Слагаемые педагогической технологии. – М. : Педагогика, 1989 – С. 190–129.
2. Беспалько В. П. Системно-методическое обеспечение учебно-воспитательного процесса подготовки специалистов: учеб.-метод. пособие. – М. : Высшая школа, 1989 – 141 с.
3. Горский Ю. М. Информационные аспекты управления и моделирования. – М. : Наука, 1978. – 223 с.
4. Горский Ю. М. Системно-информационный анализ процессов управления. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1988. – 327 с.
5. Николаев В. И. Системотехника: методы и приложения. – Л. : Машиностроение, 1985. – 200 с.
6. Печников А. Н. Теоретические основы психолого-педагогического проектирования автоматизированных обучающих систем. – Петродворец : ВВМУРЭ им. Попова, 1995. – 322 с.

УДК 656:658.562

Доронин Сергей Владимирович,
канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник учреждения РАН Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН, тел.: 8 (391)227-72-96, e-mail: s.doronin@gmail.com
Донцова Татьяна Валентиновна,
канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов в металлургии ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», тел.: 8 (391) 213-35-24, e-mail: 707atv@mail.ru

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА

S.V. Doronin, T.V. Dontsova

STATISTICAL MODELS OF TECHNOLOGICAL TRASPORT ROADS MICROPROFILE

Аннотация. *На основании экспериментальных данных о неровностях автомобильных и железных дорог построены статистические модели их микропрофиля. Эти модели использованы при постановке и решении ряда прикладных задач оценки и обеспечения прочности и ресурса несущих рам транспортных средств.*

Ключевые слова: *несущие рамы, прочность, ресурс, статистические модели микропрофиля дорог.*

Abstract. *Statistical models of roads and railways microprofile are worked out on the ground of experimental data for microprofile irregularities. These models are used to define and solute some applied problems of assessment and ensuring transport vehicles carrying frames strength and lifetime.*

Keywords: *carrying frames, strength, lifetime, roads microprofile statistical models.*

Введение

Неровности дорог являются одним из основных факторов, формирующих нагрузочный режим несущих конструкций транспортных средств. Исследование условий формирования нагрузочных режимов транспортных средств в связи с количественными характеристиками неровностей дорог является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволяет повысить технический уровень конструкций машин и обоснованность решений, принимаемых относительно рациональных режимов их эксплуатации. В наибольшей степени это относится к средствам технологического транспорта, обеспечению высокого качества дорог которых не уделяется большого внимания вследствие технологических и экономических соображений.

Значительная часть исследований характеристик фактического микропрофиля дорог и их влияния на работоспособность транспортных средств выполнена в течение нескольких десятилетий применительно к автомобильному и железнодорожному транспорту в вероятностной постановке на базе математических моделей и методов статистической динамики. Вместе с тем актуальными остаются накопление и обобщение статистических данных о характеристиках фактического микропрофиля дорог и постановка задач исследований, обусловленная возможностями, предоставляемыми современными численными методами и технологиями компьютерного моделирования.

Статистические модели микропрофиля дорог

В силу принципиально случайной природы отклонений характеристик микропрофиля дорог от номинальных значений построение моделей микропрофиля основано на классических методах теории вероятности, математической статистики и статистической динамики, предполагающих сбор статистических данных о параметрах микропрофиля и установление законов их вероятностного распределения. Последние представляют собой модели, позволяющие решать значительную часть практических задач. Дополнительные возможности могут быть реализованы построением и использованием нормированных корреляционной функции и спектральной плотности. Рассмотрим в качестве примеров статистические модели микропрофиля автомобильных и железных дорог.

Статистическая модель микропрофиля карьерной автомобильной дороги. В качестве объекта исследования выбраны характерные участки (отвал, горизонт, съезд в карьер, забой) автомобильных дорог карьера Ачинского глиноземного комбината. Измерения неровностей микропро-

филя осуществлялись с помощью специально разработанного и изготовленного измерительно-регистрирующего устройства, преобразующего вертикальные движения штока с колесом в перемещения пера самописца, регистрируемые на диаграммной ленте. Зарегистрированные характеристики микропрофиля существенно различаются для различных участков автодорог. Наибольшим уровнем неровностей характеризуется дорога в забое, в меньшей степени неровности присутствуют на отвале. Дороги на горизонтах и на съезде в карьер характеризуются минимальными значениями неровностей.

Полученные экспериментально графики микропрофилей оцифрованы и обработаны методами теории вероятностей и математической статистики. Обработка данных выполнена в соответствии со следующей методикой, основанной на общепринятом алгоритме математического описания реализаций случайных процессов [1] с учетом специфики задач статистической динамики транспортных машин [2].

1. В связи с тем, что для большинства участков карьерных автодорог характерны длительные уклоны, для каждого графика микропрофиля проведена условная плоскость через дно самой глубокой впадины таким образом, чтобы исключить влияние постоянных длительных уклонов на дисперсию функции распределения микронеровностей различных участков дорог, так как длительные уклоны не вызывают колебаний в подрессоренной системе.

2. Выбран закон распределения микронеровностей автодорог с проверкой по критерию Пирсона. Для всех участков наиболее адекватным оказалось нормальное распределение с функцией плотности вероятностей

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \qquad (1)$$

для которого определены статистические оценки его параметров – математического ожидания μ и среднеквадратического отклонения σ (табл. 1).

Таблица 1

Параметры распределения высоты неровностей микропрофиля

Участок дороги	μ, мм	σ, мм
Отвал	66,63	23,78
Горизонт	58,98	19,79
Съезд	39,40	7,60
Забой	90,22	19,23

Как видно, по мере возрастания высоты неровностей микропрофиля можно ранжировать автодороги следующим образом: съезд в карьер, горизонт, отвал, забой. При этом статистический разброс неровностей, характеризуемый среднеквадратическим отклонением, для дороги на съезде в карьер весьма невелик, что свидетельствует о достаточно высоком качестве подготовки дороги. Для остальных участков дороги показатели разброса довольно близки.

3. Выполнено центрирование графиков микропрофиля дорог, то есть проведены условные плоскости через средние значения высот неровностей. В этом случае математическое ожидание становится равным нулю, а случайная функция, описывающая микропрофиль дороги, является центрированной функцией.

4. Определены значения и построены графики нормированной корреляционной функции и нормированной спектральной плотности для скорости 1 м/с. Для любой другой скорости соответствующие функции определяются элементарно делением аргумента (времени по оси абсцисс) на величину этой скорости. Определение функций выполнено в соответствии со следующими выражениями:

- нормированная корреляционная функция

$$\rho(\tau)=\frac{M\left[H(t)H(t+\tau)\right]}{M\left[H^2(t)\right]}, \qquad (2)$$

где $H(t)$ – экспериментальная кривая микропрофиля дороги в функции времени; $M[\cdot]$ – математическое ожидание;

- нормированная спектральная плотность

$$\rho(\omega)=\frac{2}{R(0)}\int_0^\infty R(\tau)\cos\omega\tau d\tau, \qquad (3)$$

где $R(\tau)$ – корреляционная функция реализации случайного процесса (функции $H(t)$); $R(0)$ – значения корреляционной функции в момент времени $\tau = 0$.

5. Для практического использования выполнена аппроксимация эмпирических нормированных корреляционной функции и спектральной плотности следующим образом.

Корреляционная функция отражает два процесса – убывание (затухание) зависимости между все более отдаленными во времени значениями функции $H(t)$ и колебания высоты микронеровностей по гармоническому закону. В литературе [2–4] используются следующие типы выражений для аппроксимации нормированных корреляционных функций:

$$\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}\cos\beta\tau, \qquad (4)$$

$$\rho(\tau)=e^{-\alpha^2\tau^2}\cos\beta\tau, \qquad (5)$$

$$\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}, \qquad (6)$$

$$\rho(\tau)=e^{-\alpha|\tau|}\left(\cos\beta\tau+\frac{\alpha}{\beta}\sin\beta\tau\right), \qquad (7)$$

где α, β – эмпирические коэффициенты.

Соответствующие этим аппроксимациям выражения нормированной спектральной плотности имеют следующий вид [2, 5]:

$$\rho(\omega)=\frac{\alpha}{\pi}\frac{\alpha^2+\beta^2+\omega^2}{\left(\omega^2-\beta^2-\alpha^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2}, \qquad (8)$$

$$\rho(\omega)=\frac{1}{4\alpha\sqrt{\pi}}\left[e^{-\frac{(\omega+\beta)^2}{4\alpha^2}}+e^{-\frac{(\omega-\beta)^2}{4\alpha^2}}\right], \qquad (9)$$

$$\rho(\omega)=\frac{1}{\pi}\frac{\alpha}{\omega^2+\alpha^2}, \qquad (10)$$

$$\rho(\omega)=\frac{\alpha}{\pi}\frac{\alpha^2+\beta^2}{\left(\omega^2-\beta^2-\alpha^2\right)^2+4\alpha^2\omega^2}. \qquad (11)$$

Выбор одной из этих функций зависит от соотношения параметров α и β, то есть от того, что преобладает в корреляционной функции – убывание по экспоненциальному или колебания по гармоническому закону. При сравнительно малых α преобладают колебания, а при больших α – убывание. Таким образом, между характером корреляционной функции и внутренней структурой соответствующего ей случайного процесса изменения неровностей пути существует определенная связь.

Выбор той или иной аппроксимирующей функции осуществляется с использованием метода наименьших квадратов. В результате оценки эмпирических коэффициентов и соответствующих значений остаточной дисперсии D для описания нормированных корреляционных функций рассматриваемых участков автодорог определены аппроксимирующие функции, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициенты аппроксимации эмпирических данных

Участок дороги	Уравнение	α, с$^{-1}$	β, с$^{-1}$
Отвал	(4)	0,008	0,007
Горизонт	(5)	0,047	0,333
Съезд	(5)	0,052	0,050
Забой	(4)	0,016	0,001

Таким образом, выбраны следующие типы аппроксимирующих функций: для участков дороги на отвале и в забое – (4) и (8), для участков на горизонте и на съезде – (5) и (9). Они содержат в себе компоненты и затухающего, и колебательного процессов.

Статистическая модель микропрофиля рельсовой колеи

В качестве объекта исследования выбраны девять характерных участков рельсовой колеи, включающие в себя как участки магистральных железных дорог, так и железные дороги промышленного транспорта (подъездные пути предприятий и пути внутризаводского железнодорожного транспорта). Измерения характеристик микропрофиля осуществлялись с использованием путеизмерительного компьютеризированного вагона-лаборатории КВЛ-П1М. В результате измерений получены статистические массивы шести величин, полностью характеризующих состояние микропрофиля рельсовой колеи. К таковым относятся шаблон, рихтовка левая и правая, уровень, просадка левая и правая (рис. 1).

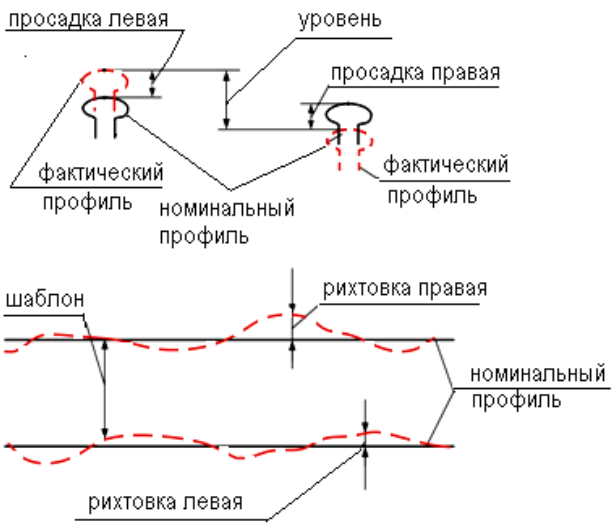


Рис. 1. Величины, характеризующие отклонения рельсовой колеи от номинального профиля

Статистическая обработка позволила установить, что указанные массивы могут быть описаны двумя законами: нормальным распределением с плотностью вероятности (1) или гамма-распределением с плотностью вероятности

$$f(x)=x^{\lambda-1}\frac{e^{-\frac{x}{\theta}}}{\theta^{\lambda}\Gamma(\lambda)}, \qquad (12)$$

где λ – параметр формы; θ – параметр масштаба.

Для этих распределений для каждого из девяти рассматриваемых участков рельсовой колеи определены параметры: для нормального распре-

деления – μ и σ, для гамма-распределения – λ и θ (табл. 3 содержит типичные значения этих параметров для одного из девяти участков).

Вычислительное моделирование микропрофиля дорог и колебаний несущих рам транспортных средств

При движении транспортного средства по дорогам с фактическим, отличающимся от номинального, микропрофилем его несущая рама воспринимает дополнительное реактивное воздействие, являющееся случайным процессом и вызывающее колебания рамы. Для математического описания взаимосвязи указанных реактивных воздействий на раму и ее колебаний традиционно используются динамические модели, состоящие из нескольких сосредоточенных масс и элементов, реализующих свойства упругости и демпфирования (рис. 2). Такие динамические модели описываются передаточной функцией, с помощью которой можно, задав на входе случайный процесс воздействия на колеса неровностей микропрофиля дороги $H(t)$, получить на выходе случайный процесс перемещений отдельных точек рамы транспортного средства. Таким образом, моделирование микропрофиля дорог и обусловленных ими колебаний несущей рамы транспортного средства являются взаимосвязанными задачами.

Укрупненный алгоритм решения этих задач может быть представлен следующей логической цепочкой: организация вычислительного цикла с шагом по времени и генерирование на каждом шаге с использованием технологии Монте-Карло величин, характеризующих отклонение фактического микропрофиля дороги от номинального, задание полученного случайного процесса неровностей микропрофиля на входе передаточной функции → вычисление случайного процесса колебаний узла сочленения рамы с подвеской, воспринимающего с ее стороны реактивные воздействия. Реализация алгоритма осуществлена в среде вычислительного пакета VisSim. На рис. 3 представлено главное окно (верхний уровень) модели, в котором осуществляется ввод основных параметров рассматриваемого транспортного средства, выбор законов распределения случайных входных воздействий (ввод их параметров) и вывод промежуточных и конечных результатов. Графический вывод результатов моделирования (рис. 4) демонстрирует (на примере моделирования движения карьерного автосамосвала) микропрофиль рассматриваемого участка дороги (кривая 1), вертикальные перемещения колеса (кривая 2), вер-

Таблица 3

Параметры вероятностных распределений величин отклонения профиля колеи от номинала

Величина	Распределение	Параметры распределения
Шаблон	Нормальное	μ = 1525,036; σ = 16,372
Просадка левая	Гамма	λ = 0,569; θ = 1,39
Просадка правая	Нормальное	μ = 2,914; σ = 4,635
Уровень	Гамма	λ = 0,084; θ = 1,66
Рихтовка левая	Гамма	λ = 0,185; θ = 1,90
Рихтовка правая	Гамма	λ = 0,271; θ = 2,82

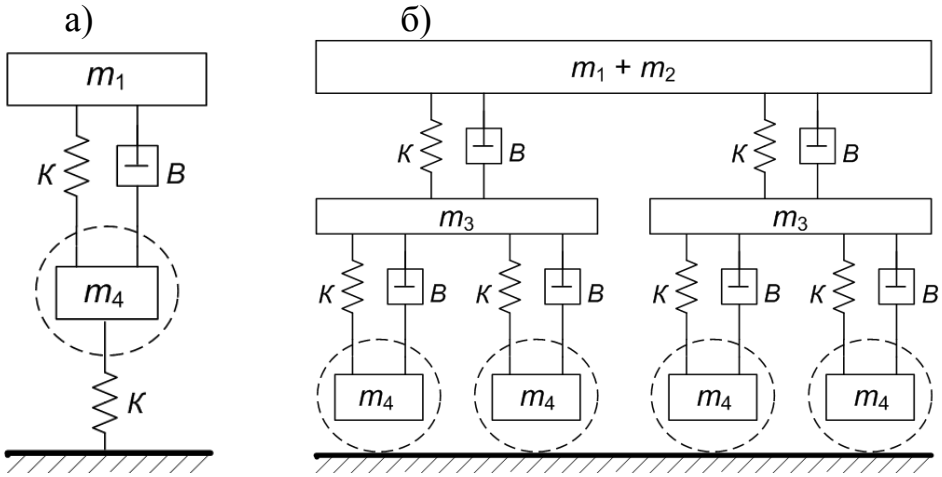


Рис. 2. Расчетные схемы динамических моделей транспортных средств: а) автомобиля (часть расчетной схемы для одного колеса); б) вагона с двойным подвешиванием: m_1 – рама; m_2 – надрессорная балка; m_3 – боковая рама; m_4 – колесо; K – упругий элемент; B – демпфирующий элемент

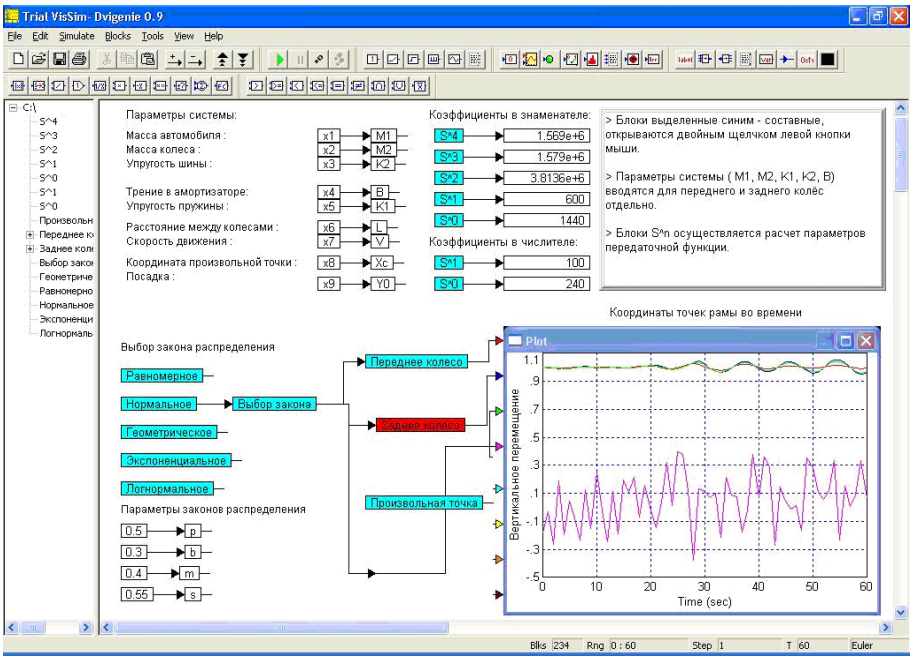


Рис. 3. Моделирование случайного процесса нагружения в пакете VisSim

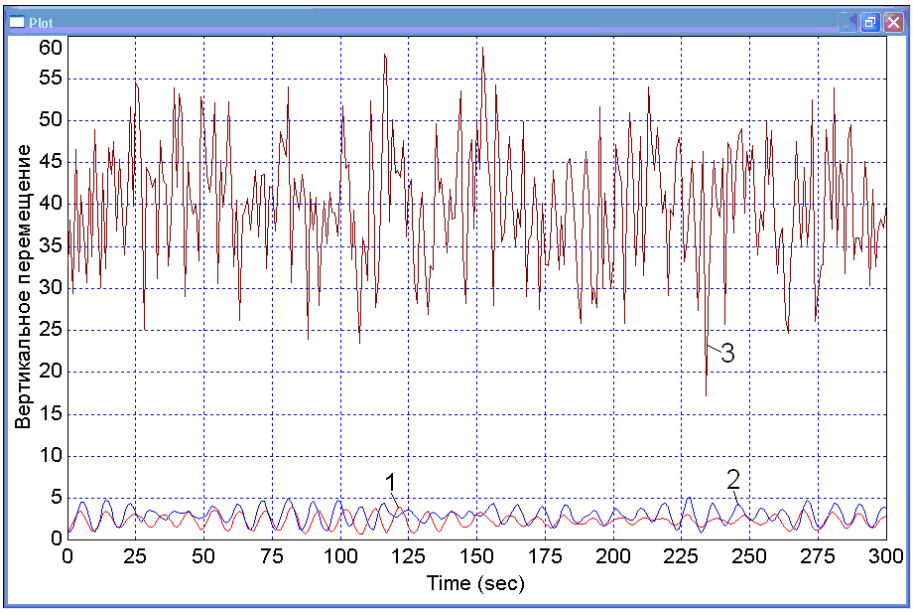


Рис. 4. Реализация микропрофиля участка автодороги (1), вертикальные перемещения колеса (2) и узла сочленения рамы с подвеской (3)

тикальные перемещения узла сочленения рамы с подвеской (кривая 3).

Прикладные задачи прочности и ресурса, основанные на статистических моделях микропрофиля дорог

Установление количественной взаимосвязи прогнозных оценок прочности и ресурса с характеристиками фактического микропрофиля предполагает рассмотрение взаимосвязанного комплекса задач (табл. 4), решение которых в полном объеме основано на методах механики твердого тела.

Реализация этого подхода для рам карьерных автосамосвалов БелАЗ позволила решить следующие прикладные задачи [6].

1. Установление зависимости опасности хрупкого разрушения и остаточного ресурса рам при многоцикловом нагружении от размера эксплуатационного трещиноподобного дефекта.

2. Обоснование периодичности технической диагностики рам в предположении возможного наличия трещиноподобного дефекта для исключения хрупкого разрушения и возникновения аварийных ситуаций.

3. Обоснование геометрических размеров

локальных усилений рамы в зонах устранения эксплуатационных трещин с использованием сварки.

4. Разработка методики обоснования рациональной структуры экскаваторно-автомобильного комплекса, учитывающей накопление повреждений и расходование ресурса рам при движении автосамосвалов по карьерным автодорогам с фактическим, полученным инструментальными измерениями, микропрофилем.

Следует отметить большие затраты времени и значительную трудоемкость реализации подхода в полном объеме в соответствии с табл. 4.

В связи с этим в некоторых случаях может быть использован разработанный и апробированный для конструкций рам думпкаров [7, 8] методический подход, основанный на применении экспертных оценок и технологии нечетких множеств. В рамках этого подхода разработана нечеткая модель силового взаимодействия рельсовой колеи с геометрическими несовершенствами, описываемыми фактическим микропрофилем, и несущих рам вагонов. Модель позволяет оценить дополнительные нагрузки в подсистеме «рельсовая колея-колесные пары-тележки-рама вагона» в связи со случайным характером геометрии рельсовой колеи.

Оценка опасности отклонений микропрофиля рельсовой колеи от номинальных значений в настоящее время регламентируется нормативными документами Министерства путей сообщения (МПС РФ) (Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности поездов (утв. МПС РФ 14.10.1997 № ЦП-515), Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути (утв. МПС РФ 01.07.2000 № ЦП-774) и др.), в соответствии с которыми устанавливается система градаций отклонений шаблона, уровня, просадки и рихтовки от номинала. Рассматривается девять диапазонов (за исключением уровня, для которого, как для подчиненного по отношению к просадке параметра, рассматривается пять диапазонов) значений этих отклонений, каждому из которых ставится в соответствие определенное количество условных единиц («баллов»). Это позволяет разнородные по физическому смыслу несовершенства рельсовой колеи выразить в рамках единой балльной системы и по накопленному на определенном участке рельсового пути количеству баллов судить об общем уровне несовершенства колеи и необходимости ограничения движения по соответствующему участку пути. Построенная таким образом балльная система принятия решений по обеспечению безопасности движения поездов фактически основана на экспертных оценках, но потенциал их

Таблица 4

Задачи оценки прочности и ресурса рам транспортных средств в связи с фактическим микропрофилем дороги

Физико-технический процесс, явление, зависимость	Моделирование
Микропрофиль дороги в силу несовершенств отклоняется от идеальной траектории. В каждой точке по ее длине l эти отклонения описываются набором параметров $\{X_i\}$, которые являются функцией длины (координаты точки по длине рассматриваемого участка дороги) $\{X_i\} = f(l)$. Для определенной скорости транспортного средства их можно рассматривать как функцию времени $\{X_i\} = f(t)$.	Генерация по установленным статистическим моделям микропрофиля описывающих его случайных параметров как функции времени $\{X_i\} = f(t)$.
Комплекс величин $\{X_i\}$ в каждой точке дороги (в каждый момент времени при движении транспортного средства) создает дополнительные усилия на колеса $\{F\} = f(t)$ (дополнительно к вертикальным реакциям дороги вследствие действия силы тяжести транспортного средства и груза).	Составление и решение уравнений равновесия и оценка системы сил $\{F\} = f(t)$.
Эти силы $\{F\} = f(t)$, трансформируясь через систему «колесо – система подвесок – рама», создают дополнительные нагрузки $\{Q\} = f(t)$ на раму транспортного средства.	Моделирование динамической расчетной схемы (определение ее передаточной функции) и оценка дополнительных нагрузок $\{Q\} = f(t)$ на раму транспортного средства.
Комплекс основных и дополнительных $\{Q\} = f(t)$ нагрузок на раму транспортного средства определяет характеристики ее напряженно-деформированного состояния (НДС).	Серия конечно-элементных расчетов НДС и установление зависимости приращения характеристик НДС от дополнительных нагрузок $\{Q\} = f(t)$.
При возросших вследствие дополнительных нагрузок $\{Q\} = f(t)$ параметрах НДС интенсифицируются процессы усталости металла и зарождения трещин в раме транспортного средства.	Моделирование накопления усталостных повреждений с использованием одной из гипотез накопления повреждений и прогноз ресурса рамы.

использования ограничен решением частной задачи установления уровня и характера безопасных отклонений параметров рельсовой колеи от номинальных значений.

Разработанный подход реализует расширенную трактовку задачи в связи с тем, что позволяет ввести в рассмотрение реактивные силовые воздействия на вагон как механическую систему со стороны рельсовой колеи следующим образом. Принимаются очевидные допущения, что отклонения от номинальных значений шаблона и рихтовки приводят к возникновению дополнительных горизонтальных, а просадки и уровня – дополнительных вертикальных нагрузок в подсистеме «рельсовая колея – колесная пара».

Реализация этого подхода для несущих рам думпкаров позволила решить прикладную задачу по оценке опасности движения вагонов по рассматриваемым участкам пути. При этом трактовка опасности принята более расширенной по сравнению с традиционной и предполагает не только возникновение аварийных ситуаций, но и ускоренное накопление усталостных повреждений вследствие высокого уровня колебаний, вызванных неровностями рельсовой колеи. В результате решения этой задачи установлено, что из девяти рассматриваемых участков два следует считать аварийно опасными (недопустимыми для движения подвижного состава), а для пяти участков требуется ограничение скорости подвижного состава, поскольку движение с номинальной скоростью приводит к ускоренному накоплению повреждений в конструкциях рам и значительному ухудшению состояния подвижного состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
2. Силаев А. А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. М. : Машиностроение, 1972. – 192 с.
3. Проскуряков В. Б. Динамика и прочность рам и корпусов транспортных машин. Л. : Машиностроение, 1972. – 232 с.
4. Савочкин В. А., Дмитриев А. А. Статистическая динамика транспортных и тяговых гусеничных машин. – М. : Машиностроение, 1993. – 320 с.
5. Грачева Л. О. Взаимодействие вагонов и железнодорожного пути: тр. ЦНИИ МПС. – Вып. 356. – М. : Транспорт, 1968. – 208 с.
6. Астахова Т. В. Повышение долговечности рам карьерных автосамосвалов на основе исследования их напряженно-деформированного состояния : дис. … канд. техн. наук. – Красноярск, 2007. 200 с.
7. Донцова Т. В., Доронин С. В., Герике Б. Л. Моделирование силового взаимодействия рельсовой колеи и рам вагонов // Вестн. КузГТУ. – 2011. – № 2. – С. 44–47.
8. Доронин С. В., Донцова Т. В., Герике Б. Л. Моделирование воздействия рельсовой колеи на рамы вагонов // Вестн. КузГТУ. – 2011. – № 2. – С. 47–50.

УДК 66.0 (075)

Обуздина Марина Владимировна,
аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экология»
Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел.: 8-914-005-005-8, e-mail: angelika86@bk.ru

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

M.V. Obuzdina

THERMODYNAMIC LAWS OF SORPTION EXTRACTION OF OIL PRODUCTS FROM INDUSTRIAL WASTE WATER

Аннотация. *Исследованы термодинамические закономерности сорбционного извлечения нефтепродуктов из промышленных сточных вод цеолитами Холинского месторождения, модифицированными высококремнеорганическими соединениями.*

Ключевые слова: *сорбция, химическая обработка, цеолиты, нефтепродукты, теплота адсорбции, изостеры, энергия активации*.

Abstact. *Thermodynamic laws of sorption extraction of oil products from industrial waste water by zeolites of the Holinsky deposit modified with high organosicon compounds are investigated.*

Keywords: *sorption, chemical processing, zeolits, oil products, warmth of adsorption, izosters, energy of activation.*

Нефтепродукты являются одними из наиболее опасных и распространенных загрязнителей поверхностных и подземных вод. В состав нефтепродуктов входит группа углеводородов нефти, мазута, керосина, масел и их примесей [1].

В практике очистки нефтесодержащих сточных вод существует большое разнообразие методов [2]. Одним из способов очистки сточных вод от нефтепродуктов является извлечение их с помощью адсорбентов различной химической природы с последующей регенерацией [3, 4].

Учитывая тот факт, что сорбционные методы очистки остаются одними из перспективных физико-химических методов, становится актуальным поиск новых эффективных и экономически выгодных наполнителей адсорбционных аппаратов и фильтров, сохраняющих свои свойства при различных условиях очистки промышленных сточных вод.

Наличие больших запасов природных цеолитов в Восточном Забайкалье позволило нам исследовать процессы их модификации в целях создания сорбционных материалов, эффективных к извлечению нефтепродуктов из промышленных сточных вод предприятий железнодорожного транспорта, а также изучить закономерности и механизмы сорбционного извлечения органических загрязнителей.

Природные цеолиты и цеолитсодержащие породы, являясь широко распространенным и дешевым минеральным сырьем, обладают уникальным спектром физических, физико-химических и адсорбционных свойств.

Холинское месторождение цеолитсодержащих пород по разведанным запасам, качеству минерального сырья, горно-геологическим условиям и экономическому положению представляется наиболее выгодным для промышленного освоения среди других известных месторождений в пределах Восточной Сибири [5]. Поэтому цеолиты данного месторождения послужили объектом проводимых исследований.

Результаты минералогического, химического, рентгенофазового анализов и ИК-спектроскопии показали, что исследуемые цеолитсодержащие туфы Холинского месторождения содержат в своем составе, %: 60–66 клиноптилолита, 3–5 монтмориллонита, 3–5 кварца, 3–5 микроклина, 10–12 кристобалита, 10–12 рентгеноаморфной фазы.

Клиноптилолит – это цеолитовой материал, который хорошо диагностируется методом рентгенофазового анализа по набору рефлексов на дифрактограмме и инфракрасной спектроскопии [6]. Идеальная кристаллохимическая формула клиноптилолита – $Na_6[Al_6Si_{30}O_{72}]\cdot 24H_2O$ (на элементарную ячейку).

Характеристические полосы поглощения на ИК-спектрах цеолитов клиноптилолитового типа проявляются при волновых числах 607 см-1

и 1202 $см^{-1}$, что характеризует колебания внешнететраэдрических Si—O—Al-связей.

Текстурно-геометрические характеристики цеолитов этого месторождения свидетельствуют об их высокой пористости – 40,87 % при среднем радиусе пор (по объему) 0,3617 мкм и поверхности микропор 6,214 мкм. Насыпная плотность составляет $(1{,}007–0{,}7789)\cdot 10^3$ кг/$м^3$. Размеры входных окон-входов от 3 до $(10–13)\cdot 10^{-10}$ м. Диаметры пор не превышают 10 Å. Объем сорбционного пространства составляет $(0{,}037–0{,}121)\cdot 10^{-1}$ $м^3$/кг, предельный сорбционный объем $(0{,}356–0{,}217)\cdot 10^{-1}$ $м^3$/кг, микропористость 24–51 %, статическая влагоемкость 3,0–8,6 % .

Одним из перспективных направлений в очистке сточных вод является создание сорбентов на основе физической или химической модификации поверхности материалов природного происхождения с целью расширения спектра извлекаемых из водных сред примесей [7].

В представленной работе были изучены сорбционные свойства образцов природных и химически модифицированных цеолитов Холинского месторождения по отношению к нефтепродуктам, присутствующим в растворах.

Процессы сорбции нефтепродуктов на природных и модифицированных цеолитах изучались на модельных растворах с исходными концентрациями органических загрязнителей (мг/л) 27, 64, 114 соответственно.

Количественный и качественный составы нефтепродуктов определяли в сточных водах методами инфракрасной спектроскопии (ИКС), газожидкостной хроматографии (ГЖХ), а также гравиметрического анализа.

Методика проведения экспериментов по адсорбционной очистке сточных вод достаточно апробирована. Поэтому изучение процессов сорбции в статических и динамических условиях проводили известными методами [9].

Исследован процесс модификации природного клиноптилолита. В качестве модификаторов поверхности исходных (природных) цеолитов предложено использовать ГМДС – гексаметилдисилазан $[(CH_3)_3Si]_2NH$ и ТЭОС – тетраэтоксисилан $(C_2H_5O)_4Si$.

Условия модифицирования были выбраны таким образом, чтобы закрепить молекулы модификаторов на поверхности цеолита и тем самым создать материал с гидрофобизированной поверхностью. Оптимальные параметры процесса модифицирования цеолита указанными соединениями устанавливались экспериментальным путем.

Экспериментально определено, что модификация ГМДС, или ТЭОС, способствует возрастанию нефтеемкости цеолита в 1,2 раза в статических условиях, по сравнению с природным цеолитом, при этом максимальной адсорбционной способностью по отношению к нефтепродуктам обладает цеолит, модифицированный ТЭОС, что позволяет рекомендовать его для практического использования в технологии очистки сточных вод.

Проведены лабораторные испытания модифицированного ТЭОС цеолита в динамических условиях. Установлено, что динамическая нефтеемкость модифицированного цеолита смеси фракций 2 мм и 5 мм составляет 2,2 мг/г, что превышает соответствующие показатели немодифицированного цеолита в 1,5 раза.

Изучены термодинамические закономерности проводимых процессов.

Константу скорости сорбции K рассчитывали по уравнению скорости реакции первого порядка. Уравнение скорости реакции первого порядка в дифференциальной форме имеет вид:

$$dC/dt = KC. \qquad (1)$$

Уравнение скорости реакции в интегральной форме:

$$K = 2{,}303\lg(C_0/C)/t, \qquad (2)$$

где C_0 – исходная концентрация нефтепродуктов в растворе, мг/л, $C_0 = 64$.

C – равновесная концентрация нефтепродуктов в растворе, мг/л;

$$\lg(C_0/C) = 0{,}434Kt;$$

$$\lg C = \lg C_0 - 0{,}434Kt;\ tg\alpha = 0{,}434K,$$

где α – угол наклона касательной к кинетической кривой к положительному направлению оси x. Результаты расчета компоненты скорости реакции представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета компоненты скорости

Температура T, К	K, $сек^{-1}$	
	цеолит Холинского месторождения, модифицированный ГМДС	цеолит Холинского месторождения, модифицированный ТЭОС
280	0,43	0,47
285	0,56	0,62
293	1,01	1,2
300	1,15	1,66
310	1,85	1,86

Данные таблицы свидетельствуют об увеличении скорости адсорбции *K* с увеличением температуры. Это объясняется тем, что движение молекул увеличивается и они быстрее взаимодействуют с поверхностью адсорбента, т. е. увеличивается внешняя диффузия.

Еще одним доказательством увеличения скорости адсорбции при изменении температуры является вид кинетических кривых концентрации в растворе С = 64 мг/л (рис. 1, 2). Кривые, полученные при более высоких температурах, лежат выше кривых, полученных при низких температурах, что характерно для таких систем, которые находятся в состоянии равновесия, следовательно, процесс является активированным.

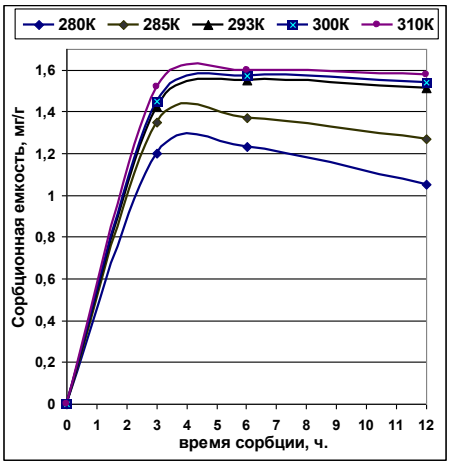


Рис. 1. Кинетическая зависимость сорбции нефтепродуктов клиноптилолитом, модифицированным ГМДС при различных температурах

Активированный процесс представляет собой диффузию молекул нефтепродуктов через входные окна цеолита в расположенные за ними полости. Если диаметр молекул адсорбата близок к диаметру входного окна, а критический размер самой молекулы несколько больше, то молекулы должны преодолеть некоторый энергетический барьер, поэтому скорость их продвижения в полость имеет положительный температурный коэффициент. Число молекул, действительно входящих в полость в определенный промежуток времени, и измеряемая величина адсорбции возрастают с увеличением температуры. При достаточно высоких температурах эта скорость становится высокой и устанавливается равновесие [8].

Следует отметить, что скорость зависит не только от критического размера молекулы, но и от её длины, а также от диаметра и формы окон самого цеолита и величины энергии активации молекул адсорбата.

В то же время, близкие размеры молекул различных веществ еще не определяют равные скорости их сорбции, т. к. помимо молекулярно-ситового действия большое влияние оказывает химическая природа адсорбата, его способность к специфическому взаимодействию с цеолитом.

Однако, помимо молекулярно-ситового и адсорбционного действия, на кинетику сорбции большое влияние оказывают такие факторы, как давление пара, степень заполнения цеолита, условия термообработки и температура.

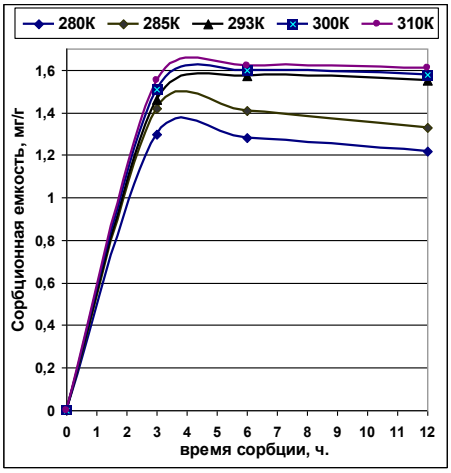


Рис. 2. Кинетическая зависимость сорбции нефтепродуктов клиноптилолитом, модифицированным ТЭОС при различных температурах

Адсорбция является процессом самопроизвольным. Тепловой эффект в интервале изменения степени заполнения адсорбционного пространства характеризуется дифференциальной теплотой адсорбции.

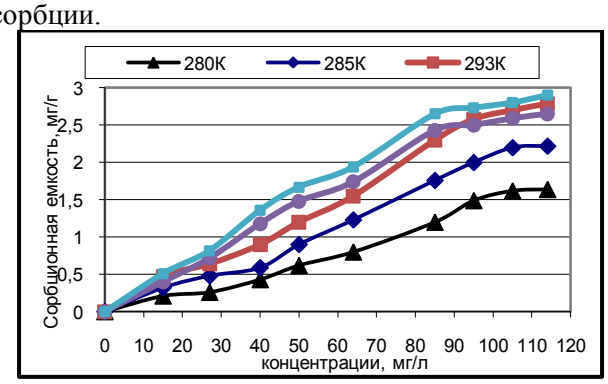


Рис. 3. Изотерма сорбции нефтепродуктов клиноптилолитом, модифицированным ГМДС при различных температурах

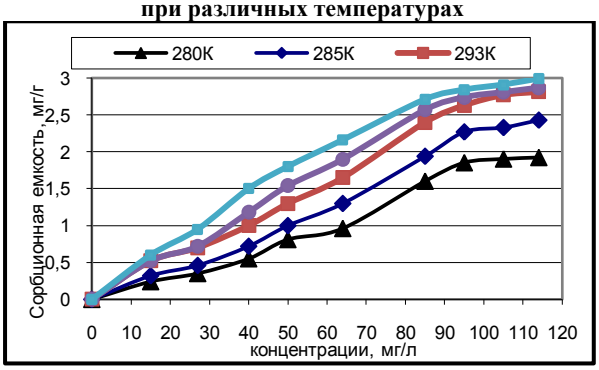


Рис. 4. Изотерма сорбции нефтепродуктов

клиноптилолитом, модифицированным ТЭОС при различных температурах

В тонких порах цеолитов, размеры которых по порядку величин соизмеримы с размерами адсорбируемых молекул, поля адсорбционных сил, создаваемые противоположными стенками пор, перекрываются. В результате в таких порах происходит повышение адсорбционных потенциалов и рост дифференциальных теплот адсорбции, а следовательно, значительно возрастают и величины адсорбции. Изостерический метод расчета теплоты адсорбции основан на применении известного уравнения Клайперона – Клаузиуса при постоянной емкости сорбента A:

$$\frac{\Delta \ln C}{\Delta(1/T)} = -\frac{Q}{R}, \qquad (3)$$

где T – температура, К; R – газовая постоянная, кДж/моль·К; C – равновесная концентрация нефтепродуктов в растворе, мг/л.

Из уравнения (3) при $A = const$ можно определить изостерическую дифференциальную теплоту сорбции Q, кДж/моль:

$$Q = -R\frac{\Delta \ln C}{\Delta(1/T)}. \qquad (4)$$

Изостера адсорбции является очень важной функцией, несущей непосредственную информацию о теплоте адсорбции. Изостеры отражают взаимосвязь равновесных температур и концентраций при постоянной емкости сорбента. При A = *const*:

$$\ln C = f(1/T).$$

На рис. 6 представлены изостеры сорбции нефтепродуктов природным цеолитом Холинского месторождения, модифицированного ТЭОС и ГМДС при различных температурах.

Таким образом, для исследуемых адсорбентов теплота адсорбции по всей поверхности изменяется. Молекулы адсорбируются, в первую очередь, на самых активных местах поверхности, теплота сорбции при этом имеет наибольшее значение. По мере заполнения самых активных точек в процесс вступают менее активные и теплота постепенно падает.

По углам наклона изостер можно рассчитать дифференциальные теплоты сорбции нефтепродуктов в соответствии с уравнением (4). Результаты расчета теплоты сорбции нефтепродуктов представлены в табл. 2.

Следует отметить, что не все молекулы при адсорбции могут проникнуть в поры и адсорбироваться, а лишь те, которые обладают некоторым избытком энергии – энергией активации E_a.

Расчет энергии активации сорбции можно проводить по уравнению [8]:

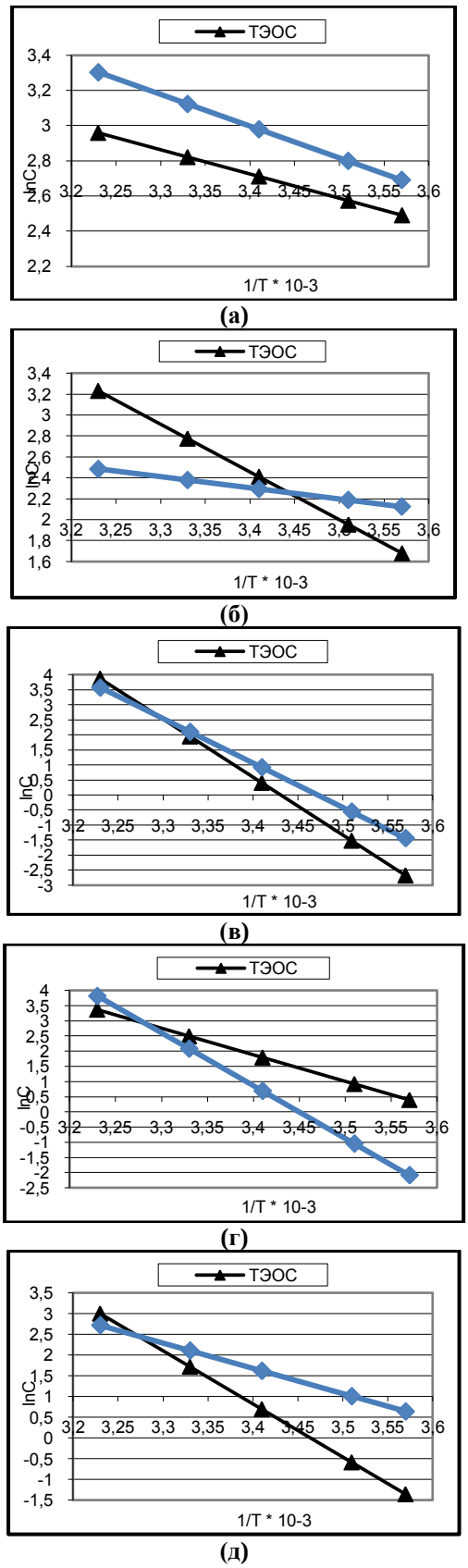


Рис. 6. Изостеры сорбции нефтепродуктов клиноптилолитом, модифицированным ТЭОС и ГМДС при температурах 280 К (а) , 285 К (б), 293 К (в), 300 К (г) и 310 К (д)

Таблица 2

Результаты расчета теплоты сорбции нефтепродуктов

Сорбент	Емкость A, мг/г	$1/T\ 10^{-3}\ К^{-1}$	Теплота адсорбции, Q, кДж/моль
Цеолит Холинского месторождения, модифицированный ГМДС	1,92	3,57	9,45
	2,43	3,51	56,5
	2,81	3,41	1,11
	2,87	3,33	3,67
	2,99	3,23	2,5
Цеолит Холинского месторождения, модифицированный ТЭОС	1,64	3,57	2,5
	2,22	3,51	10,82
	2,79	3,41	5,49
	2,65	3,33	29,03
	2,90	3,23	53,23

$$E_a = 2{,}303R\frac{\Delta \ln K}{\Delta(1/T)}. \quad (5)$$

При увеличении E_a скорость адсорбции начинает в больше степени меняться в интервале температур 300–310 К. Энергия активации рассчитана графическим методом по уравнению

$$E_a = 2{,}303R \cdot tg\alpha. \quad (6)$$

Энергия активации сорбции нефтепродуктов цеолитом, модифицированным ГМДС и ТЭОС, составляет 22,6 кДж/моль и 62,7 кДж/моль соответственно.

Полученные значения энергии активации для нефтепродуктов подтверждаются высокими кинетическими характеристиками исследуемых сорбентов. Температурная зависимость и значения энергии активации сорбции свидетельствуют о том, что исследуемые процессы подчиняются законам физической адсорбции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шанайца П. С. Обезвреживание нефтесодержащих и фенольных загрязнений // Транспорт и окружающая среда – 2006. – № 4. – С. 60–65.
2. Бордунов В. В, Бордунов С. В., Леоненко В. В. Очистка воды от нефти и нефтепродуктов // Экология и промышленность России. – 2005. – № 8. – С. 24–26.
3. Герасимова В. Н. Природные цеолиты как адсорбенты нефтепродуктов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – № 11. – С. 481–488.
4. Свиридов А.В., Ганедных Е.В., Елизаров В.А. Алюмосиликатные сорбенты в технологиях очистки воды // Экология и промышленность России. – 2009. – №11. – С.28–30.
5. Котов П. А. Месторождения Забайкалья. – М. : Геоинформмарк, 1995. – 280 с.
6. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. – М. : Мир, 1982. – 327 с.
7. Хараев Г. И, Хантургаева Г. И, Захаров С. Л, Ширетова В. Г. Очистка от нефтепродуктов природными цеолитсодержащими туфами // Безопасность жизнедеятельности. – 2007. – №2. – С. 29–32.
8. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. – М. : Химия, 1984. – 592 с.
9. Смирнов А. Д. Сорбционная очистка воды. – М. : Химия. – 1982. – 168 с.

УДК 621.928.93+004.67+004.421

Темникова Елена Александровна,
соискатель каф. вычислительных машин и комплексов
Ангарской государственной технической академии (АГТА), e-mail: lenchik89-07@mail.ru
Асламова Вера Сергеевна,
д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизации и электроснабжения промышленных предприятий АГТА,
e-mail: weras@agta.mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

E.A. Temnikova, V.S. Aslamova

THE AUTOMATED SYSTEM OF STUDIES PROCESS

Аннотация. *Представлена автоматизированная система мониторинга учебного процесса, разработанная для учебного центра «Профиль». Система позволяет автоматически составлять расписание занятий и рассчитывать коэффициент эффективности учебного процесса, снизить трудоемкость обработки данных, формировать и выдавать на печать все требуемые формы отчетов. Созданная автоматизированная система имеет простой и удобный интерфейс, является также хранилищем данных, позволяет их обрабатывать, избавит пользователей от лишней бумажной волокиты.*

Ключевые слова: *автоматизированная система, моделирование, коэффициент эффективности учебного процесса, мониторинг.*

Abstract. *The automated system for monitoring the educational process developed for the training center «Profile» is presented. The system allows to automatically schedule activities and to calculate the coefficient of efficiency of educational process, reduce the complexity of data processing, create and printout all forms of reports. The automated system has simple and intuitive interface. It is also a data warehouse, which allows to handle data, saves users from unnecessary paperwork.*

Keywords*: automated system simulation, coefficient of efficiency of educational process, monitoring.*

Введение

В настоящее время проблема промышленной безопасности с каждым годом становится все более актуальной. Постоянно усложняющийся характер производства, использование новых видов оборудования, освоение новых источников энергии содержит в себе все возрастающий фактор опасности, увеличивается вероятность аварийных ситуаций различного уровня тяжести, техногенных аварий и катастроф. В связи с этим задача своевременного и качественного обучения рабочих и инженерно-технических работников, задействованных в структуре производства, приобретает все больший приоритет. Автономная некоммерческая организация Учебный центр (УЦ) «Профиль» была основана в 2005 году для оказания услуг дополнительного профессионального образования в области промышленной безопасности. В рамках системы менеджмента качества в УЦ предусмотрен постоянный мониторинг учебного процесса, анализ качества обучения, корректировка методики преподавания, качества раздаточного материала, принцип формирования группы и другие аспекты организационной и учебно-методической деятельности.

Разрабатываемая система менеджмента качества (СМК) образовательного процесса УЦ базируется на принципах международных стандартов ISO 9000, Стандартов и Директив ENQA или моделей EFQM [1].

Цель работы: создать программное обеспечение (ПО), которое позволит автоматически решать следующие задачи:

- первичная обработка заявок, включающая в себя процедуру определения области аттестации;
- составление списков слушателей (клиентов учебного центра (УЦ));
- реализация учебного процесса, подготовка учебно-методического комплекса, оформление протоколов, свидетельств, удостоверений в зависимости от направления обучения и вида ответственности слушателя;
- адекватная оценка качества обучения и работы УЦ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математические модели рас-

чета дисперсии наполняемости групп, коэффициента эффективности обучения.

2. Спроектировать базу данных.

3. Спроектировать и реализовать программную часть автоматизированной системы на основе современных средств программирования.

Математическое обеспечение

Рассматривая образование как некий интеллектуальный продукт, его качество следует оценивать с позиции потребителя [1]. Поэтому необходимо разработать сбалансированную систему показателей, при которой учитываются три класса показателей, а именно показатели удовлетворенности клиентов, показатели эффективности процессов в организации и показатели удовлетворенности собственных сотрудников.

Авторами разработаны следующие показатели оценки качества обучения: процент слушателей, успешно сдавших экзамен (П), коэффициент эффективности обучения $K_{эфф}$, дисперсия наполняемости групп, позволяющая оценить качество составляемого расписания занятий [2]. Дисперсия наполняемости групп вычисляется по формуле

$$D_i = \sqrt{\left(n_{sr}^2 - n_i^2\right)},$$

где n_{sr} – среднее количество слушателей в группе по данной подготовке, n_i – количество слушателей на i-й подготовке.

Для анализа качества обучения введен коэффициент эффективности Кэфф, который вычисляется на основании входного и выходного анкетирования Слушателей. В анкете 1 (до начала обучения) представлены следующие вопросы:

- идентифицирующие личность слушателя и общие задачи обучения;

- определяющие более узкую специализацию слушателя – эти вопросы позволяют преподавателю сориентироваться на разделах программы, непосредственно связанных с трудовой деятельностью слушателей;

- выясняющие начальный уровень знаний слушателя в области обучения. Эти вопросы также позволяют преподавателю сориентироваться на разделах программы, по которым обнаружились пробелы в знаниях слушателей, и дают информацию для последующего анализа показателей качества обучения.

Анкета 2 (по окончании обучения) включает вопросы:

- позволяющие уточнить степень удовлетворенности слушателей качеством обучения – ответы на эти вопросы дают информацию преподавателю в плане совершенствования методики преподавания и содержания учебного материала;

- определяющие уровень знаний слушателя по окончании курса – они позволяют рассчитать показатели качества обучения, построить объективную картину обучаемости Слушателей на основе статистической обработки данных за определенный промежуток времени (в том числе можно оценить степень ответственности организаций в отношении требований к персоналу и организации обучения своих сотрудников);

- для выяснения мнения Слушателей (формирование обратной связи), которое позволяет выявить недостатки в организации процесса обучении со стороны учебного центра, корректность постановки вопросов анкет, проанализировать пожелания слушателей. На рис. 1 представлена структура системы измерений показателей качества посредством входного и выходного анкетирования.

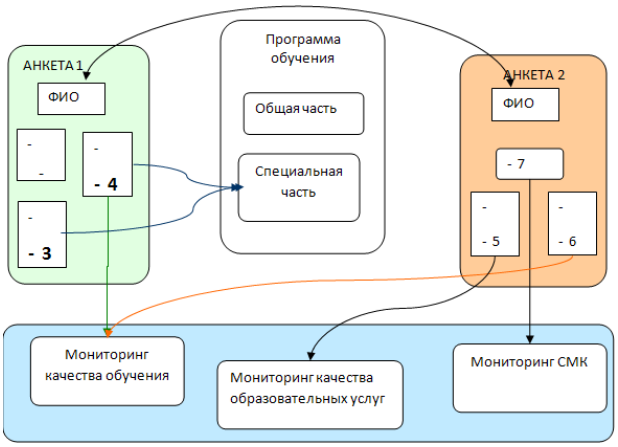


Рис. 1. Структура системы измерений показателей качества посредством входного и выходного анкетирования

Показатель начального уровня знаний подсчитывается по формуле:

$$П_{y_1} = \sum_{i=1}^{n} П_i \cdot \nu_i, \qquad (1)$$

где $П_i$ – оценка ответа на текущий вопрос, I – номер текущего вопроса, n – количество вопросов в анкете, ν_i – весовой коэффициент текущего вопроса. Весовые коэффициенты введены с целью приведения значения рассчитанных показателей уровня к единому диапазону (0–1), независимо от количества вопросов в данной анкете.

Аналогичным образом подсчитывается показатель уровня знаний по окончании курса обу-

чения $П_{у_2}$ на основании оценки ответов на вопросы «выходной анкеты». Вопросы выходной анкеты составлены на основании содержания программы обучения по конкретной тематике с учетом соответствующих Правил, утвержденных Ростехнадзором. Коэффициент эффективности обучения вычисляется по формуле (2):

$$K_{эфф} = \frac{(П_{у_2} - П_{у_1} + 3)}{(П_{у_2} + П_{у_1})} \cdot \exp\frac{1}{2}(П_{у_2} - 6). \quad (2)$$

В данной формуле смещение «3» введено с целью вывести показатели, соответствующие удовлетворительному качеству обучения, из минусовой области для адекватной их идентификации. Смещение «6» в показателе степени введено с целью вывести из рассмотрения неприемлемые результаты обучения, при которых Слушатели не могут быть аттестованы. Все возможные варианты результатов представлены в табл. 1 и на рис. 2, построенном по данным табл. 1. В соответствии с расчетными результатами $K_{эфф}$, преподаватель (или представитель руководства по качеству) при анализе качества обучения может выставить оценку и перевести ее в балльную шкалу. Таблица оценок (см. табл. 2) должна соответствовать табл. 1.

При анализе системы менеджмента качества (СМК) производится расчет показателей эффективности обучения по всем группам обучения (или выборочно). Рассчитанные и сведенные в таблицу показатели качества процесса обучения могут быть подвергнуты дальнейшему анализу и статистической обработке.

Для измерения показателей удовлетворенности заказчиков применяется социологический метод. Руководителям предприятий рассылаются анкеты, в которых предлагается оценить по трехбалльной системе такие показатели, как Оперативность, Качество подготовки, Удовлетворенность слушателей. В табл. 3 приведены показатели удовлетворенности, их градации, соответствующие им весовые значения и диапазоны возможных значений.

Таблица 1

Расчет коэффициента эффективности обучения

П у_2 / П у_1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	8,061	4,93	3,02	1,855	1,143	0,708	0,44	0,279	0,18	0,123
2	6,773	4,074	2,446	1,466	0,875	0,52	0,31	0,179	0,102	0,055
3	5,684	3,361	1,977	1,154	0,667	0,379	0,21	0,112	0,054	0,021
4	4,75	2,758	1,586	0,899	0,5	0,27	0,14	0,064	0,023	0
5	3,941	2,241	1,255	0,687	0,364	0,182	0,08	0,028	0	-0,01
6	3,233	1,793	0,971	0,507	0,25	0,11	0,04	0	-0,02	-0,02
7	2,608	1,401	0,725	0,353	0,154	0,051	0	-0,02	-0,03	-0,03
8	2,053	1,055	0,51	0,22	0,071	0	-0,03	-0,04	-0,04	-0,04
9	1,556	0,747	0,32	0,103	0	-0,04	-0,06	-0,06	-0,05	-0,04
10	1,108	0,472	0,151	0	-0,06	-0,08	-0,08	-0,07	-0,06	-0,04

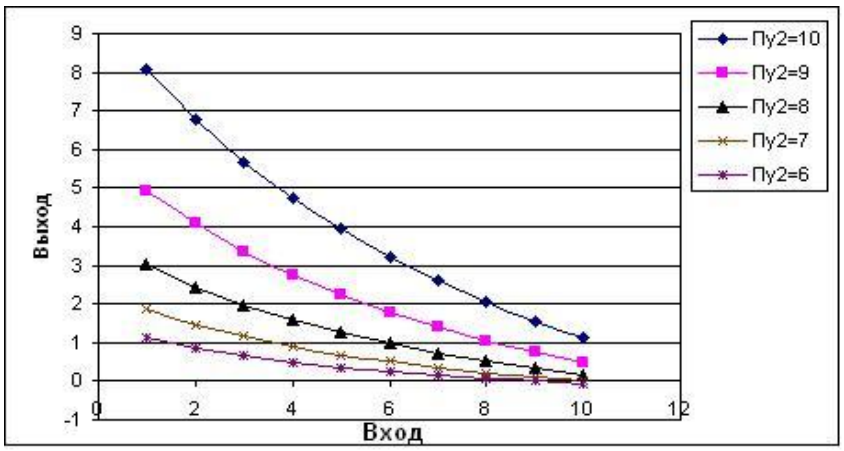


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов эффективности обучения от «входного» и «выходного» уровня знаний Слушателей

С целью оптимизации и снижения временных затрат анализа СМК предлагается разработка автоматизированной системы мониторинга учебного процесса (АСМУП), в которой предусмотрено создание баз данных по категориям информационных потоков учебного центра, автоматическое заполнение таблиц и отчетов по качеству, автоматический расчет коэффициента эффективности обучения и других показателей качества, определенных в спецификациях основных процессов учебного центра.

Программная реализация

АСМУП работает в архитектуре «клиент/сервер», главное достоинство которой – распределенная обработка данных, т. е. выполнение серверной частью программы запросов клиентской части. Серверная часть приложения обеспечивает хранение данных и их обработку, а клиентская часть передает серверу соответствующие запросы.

Также система оснащена базой данных «BAZA», основное назначение которой состоит в хранении всех необходимых данных (об организации-заказчике, о группах, профиле обучения, о преподавателях и многие другие). Данная база данных является реляционной, информация хранится в виде логических таблиц с уникальными записями. Ниже на рис. 3 отображена структура базы данных (БД).

Разработаны следующие таблицы: «Заявка», «Группа», «Преподаватель», «Организации», «Клиент по заявке», «Заявка группы», в которых содержится вся основная, сформированная и наиболее полная информация, с которой мы чаще всего будем работать. Справочниками (можно назвать списками) являются: «Тип заявки», «Профиль», «Место» – список адресов и аудиторий, где будут проводиться занятия, «Программа подготовки», «Вид документа», т. е. аттестат, сертификат,

Таблица 2

Таблица оценок

Выход / Вход	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
1	отл	отл	хор	удовл	удовл	неуд	неуд	неуд	неуд	неуд
2	отл	отл	хор	удовл	удовл	неуд	неуд	неуд	неуд	неуд
3	отл	отл	хор	удовл	удовл	неуд	неуд	неуд	неуд	неуд
4	отл	отл	хор	удовл	удовл	неуд	неуд	неуд	неуд	
5	отл	отл	хор	удовл	удовл	неуд	неуд	неуд		
6	отл	хор	хор	удовл	удовл	неуд	неуд			
7	отл	хор	хор	удовл	неуд.	неуд				
8	отл	хор	удовл	удовл	неуд.					
9	отл	хор	удовл	удовл						
10	отл	хор	удовл	удовл						

Таблица 3

Показатели удовлетворенности заказчиков

№ п/п	Показатели удовлетворенности	Варианты ответов	Заполняется заказчиком	Балл	Формула для расчета	Целевые показатели	Допустимые показатели
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Оперативность, ОП	хорошо		2	$ОП = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} балл_i$	2	>1
		удовл		1			
		неуд		–1			
2	Качество подготовки, КП	хорошо		2	$КП = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} балл_i$	2	>1
		удовл		1			
		неуд		–1			
3	Удовлетворенность слушателей, УС	хорошо		2	$УС = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} балл_i$	2	>1
		удовл		1			
		неуд		–1			

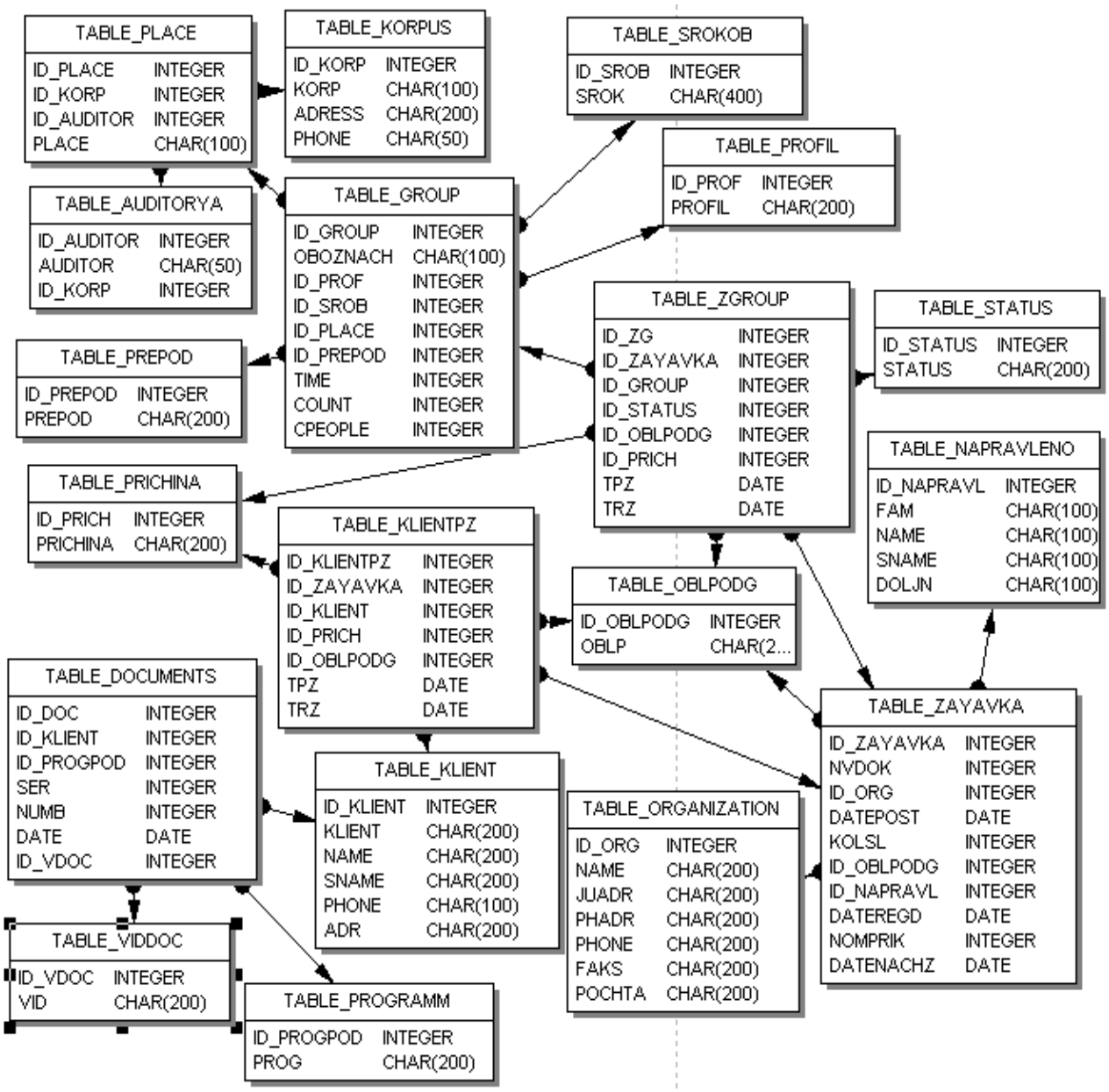


Рис. 3. Структура БД

свидетельство и т. д., «Область подготовки», «Причина» – в данном справочнике будет указана причина подготовки или переподготовки клиента, «Клиент», «Преподаватель», «Срок обучения», «Статус» – в них указывается статус заявки: ожидание или допуск. В качестве сервера БД используется FireBird SQL Server, на который ложится основная нагрузка по поддержанию целостности БД, ее восстановлению после сбоев, защита БД и обработка запросов. Для удобного интерфейса используется клиентское приложение на языке программирования Borland Delphi 7.0. Данное приложение отвечает за обработку результатов и двустороннюю связь с БД.

При запуске приложения открывается главная форма заявок от организаций «Заявка». В этой форме отображена таблица с данными, которую мы можем редактировать и выводить на печать в любом формате, поддерживаемом Microsoft Office Word, а также главное меню программы, благодаря которому пользователь может открыть другие таблицы, справочники и отчеты.

В качестве примера на рис. 4, 5 представлено несколько форм, с которыми может работать пользователь.

На рис. 6 и 7 приведена блок-схема основной программы.

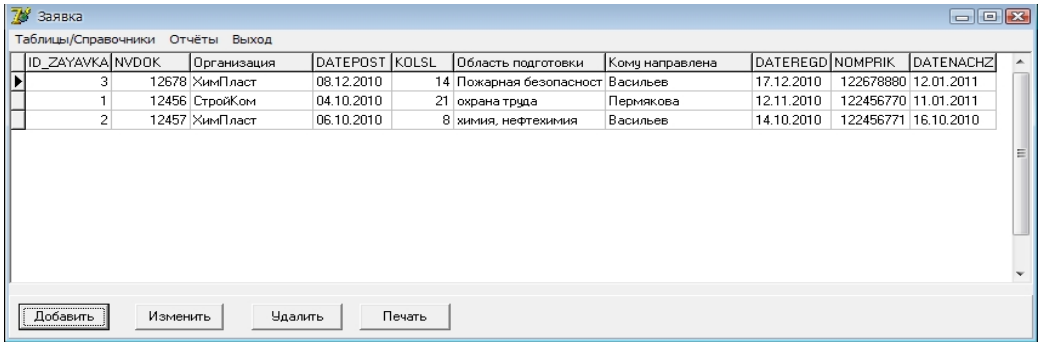


Рис. 4. Таблица «Заявка»

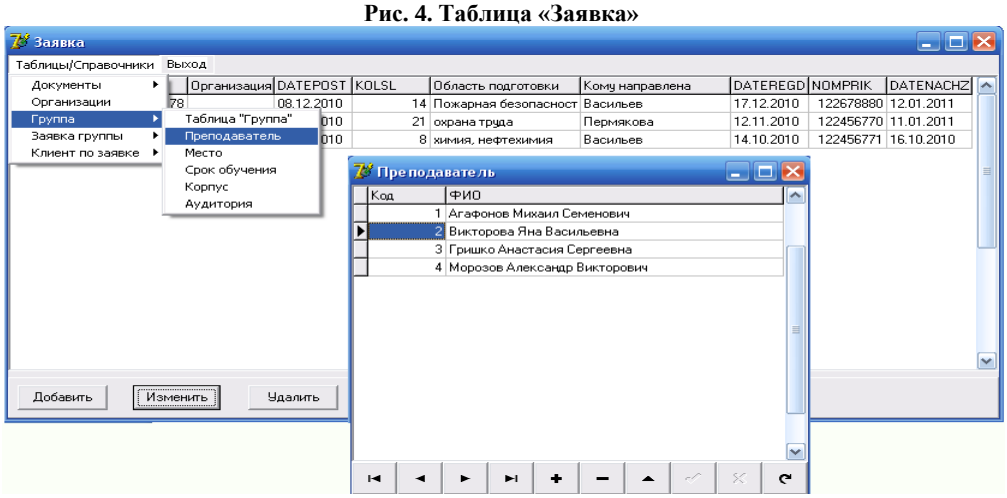


Рис. 5. Справочник «Преподаватель»

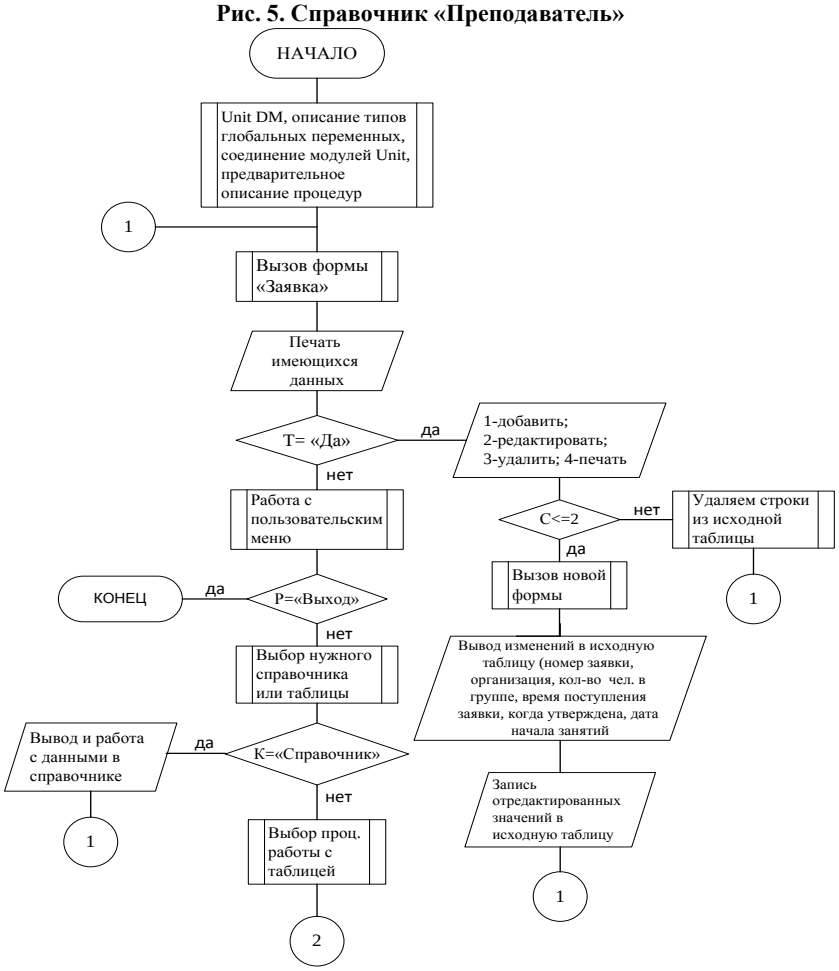


Рис. 6. Блок-схема программы

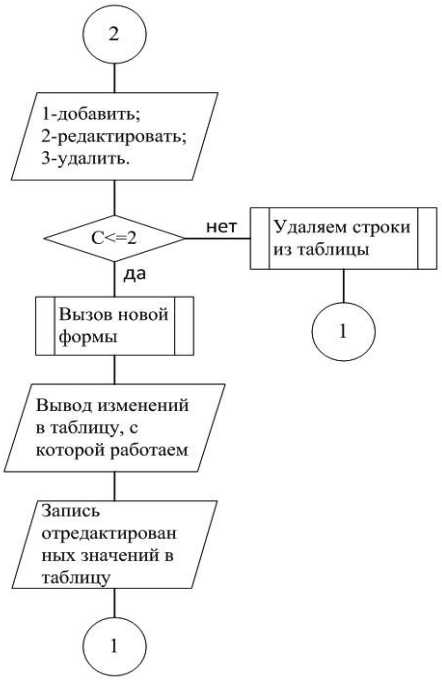


Рис. 7. Продолжение рис. 6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аниськина Н. Н. Подготовка к сертификации интегрированной системы менеджмента в территориальной генерирующей компании // ММТТ-23 : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. / Балакирева В. С. – Саратов : изд-во Сарат. гос. техн. института. – 2010. – : Т 11. – С. 188–192.
2. Голубцова Т. В., Замыслова Г. П., Асламова В. С. Показатели качества процесса обучения в организации дополнительного профессионального образования // ММТТ-23 : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф.– Саратов : изд-во Сарат. гос. техн. ин-та. – 2010. – Т. 12. – С. 170–174.
3. Темникова Е. А., Голубцова Т. В., Асламова В. С. Разработка программного обеспечения для автоматизации процесса обучения слушателей учебного центра «Профиль»: сб. науч. тр. молодых ученых и студентов. – Ангарск : АГТА. – 2010. – С. 78–83.

УДК 621.3.083

Пудалов Алексей Дмитриевич,
канд. техн. наук, доцент кафедры ПЭ и ИИТ, Ангарская государственная техническая академия,
e-mail: puddim@rambler.ru

УНИФИЦИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СХЕМА ПРИБОРОВ АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

A.D. Poudalov

UNITIZED METERING CIRCUIT OF INSTRUMENTS OF ANALYTICAL CONTROL

Аннотация. *В статье рассматриваются проблемы унификации схем приборов для аналитических измерений. Приведена структурная схема унифицированного прибора, предназначенного для измерений в широких диапазонах концентраций влажности газов и жидкостей.*

Ключевые слова: *прибор, аналитические измерения, унификация, измерения влажности, электронная схема.*

Abstract. *In the article problems of unification of schemes of devices for analytical measurements are considered. The block diagram of the unified device intended for measurements in wide ranges of concentration of humidity of gases and liquids is resulted.*

Keywords: *instrument, analytical measurements, unifications, humidity measurements, electronic circuit.*

Аналитические измерения в промышленности и на производстве занимают очень важное место в технологических, теплоэнергетических и химических процессах и позволяют обеспечивать высокий научно-технический уровень готовой продукции. Современные высокотехнологичные производства в процессе совершенствования своих технологий постоянно нуждаются в высокоточных и быстродействующих измерительных приборах.

Как правило, современные разработки в области аналитического приборостроения идут по пути создания измерительных схем приборов в уникальном виде. Под уникальностью понимается, что измерительное устройство выполняет только лишь ту конкретную измерительную функцию, для которой оно создавалось. В связи с этим, каждый прибор содержит электронную схему, которая

решает конкретную измерительную задачу. В случае разработки нового измерительного устройства, например, с другими метрологическими и техническими характеристиками электронная схема также разрабатывается заново, что приводит к удорожанию разработки и производства прибора.

К электронной схеме приборов относятся: блоки питания, вторичные преобразователи сигналов с датчиков, системы индикации, схемы обработки результатов измерений и т. д. Зачастую, даже если принципы измерений, положенные в основу различных измерительных устройств, одинаковы, электронная схема независимо от этого разрабатывается отдельно для каждого устройства.

Например, отечественные и зарубежные производители выпускают ряд аналитических приборов для измерения различных физических величин:

1. ОАО «Ангарское ОКБА» изготавливает гигрометры «Байкал 5Ц», «Байкал-2ВМ», «Баргузин-2М», «Байкал RG»; влагомеры «ВТМ-2» и «ВТМ-МК»; газоанализатор «АДГ-210» и др. [1, 2].
2. ИКО «Зеленоград-Информ-Прибор» предлагает газоанализаторы ОКА-92М, Хоббит-Т; термометры ТК-5.11, ТК-5.01П; пирометры С-110, С-700.1 и др. [3].
3. Компании Michell Instruments lab UK, ARTVIK, VAISALA выпускают приборы «Moisture Chek 2000», «Dewmet», «S4000 Integrale» и др. [4, 5].

Все перечисленные приборы имеют в своем составе уникальные электронные схемы, позволяющие производить обработку только тех сигналов, для измерения которых они и создавались.

Таким образом, важной задачей, которая на сегодняшний день подлежит решению, является унификация измерительных схем приборов, основанных как на одном, так и на разных методах измерения, положенных в основу работы этих приборов (кулонометрические, твердоэлектролитные, сорбционные, диэлькометрические и др.).

Унифицированная измерительная схема должна осуществлять обработку сигналов, поступающих от первичных преобразователей, и представлять измерительную информацию в требуемом для потребителя виде, т. е. отображаться на экране прибора в единицах измеряемой величины. Схема должна быть программно управляемой и иметь возможность работы в составе АСУТП.

Поставленная задача может быть успешно решена путем использования микропроцессорных систем на основе одноплатного компьютера. В настоящее время такие компьютеры разработаны и выпускаются в достаточно большом ассортименте многими отечественными и зарубежными фирмами [6]. Эти компьютеры имеют сравнительно небольшие размеры (90×96 мм) и сравнительно невысокую стоимость (1,5…5 тыс. руб.) и обладают большими возможностями для обработки сигналов датчиков:

- объем оперативной памяти свыше 256 Мб;
- поддержка стандартных интерфейсов RS232, RS485, USB 2.0, Ethernet LAN, WLAN;
- возможность подключения жестких дисков;
- высокое быстродействие процессора до 2 ГГц;
- широкий диапазон рабочих температур от –40 °С до +85 °С;
- разъем для подключения панельной индикации;
- низкая потребляемая мощность;
- совместимость с персональными компьютерами, имеющими стандартное программное обеспечение.

Стоящая перед автором статьи задача разработки унифицированной измерительной системы решена применительно к её внедрению в разрабатываемых измерителях влажности газов и органических жидкостей, основанных на сорбционно-частотном методе (СЧМ) [7, 8]. Суть его заключается в определении влажности вещества в соответствии с изменением частоты кварцевого пьезочувствительного элемента, на который нанесена влагопоглощающая пленка – сорбент. В зависимости от измеряемой влажности (микро- или макроконцентрации) применяются различные сорбенты. Процессы сорбции-десорбции приводят к изменению присоединенной массы и соответственно частоты колебаний пьезокварцевого чувствительного элемента.

Использование СЧМ позволяет работать измерительной системе частотным видом измеряемого сигнала. В этом случае требуется обработка частотного аналогового сигнала микропроцессорной системой. Данная задача успешно решена следующим образом: на вход измерительного прибора подается не непосредственно сигнал с частотой, пропорциональной измеряемой величине, а разностная частота между образцовой (заранее известной и с неизменяющимися параметрами) и частотой с датчика. Еще одним преимуществом подачи разностного сигнала является исключение влияния температуры окружающей среды на измеряемый сигнал, т. к. температура в одинаковой степени будет воздействовать на опорный резонатор и сам чувствительный элемент.

Структурная схема предлагаемого унифицированного измерительного прибора представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема унифицированного измерительного прибора

При разработке унифицированного измерительного прибора возникает вопрос об основных принципах его функционирования, позволяющих говорить об унификации. В данном случае речь идет о решении задачи архитектурного устройства такой измерительной системы.

Одним из направлений решения поставленной задачи может быть использование в измерительном приборе нескольких каналов, по которым подаются нормированные сигналы с датчиков. С помощью блока управления задается тип подключаемого датчика, и вычислительная часть системы обрабатывает поступающую измерительную информацию в соответствии с заложенной программой. Наличие нескольких измерительных каналов необходимо в случае, если требуется произвести одновременно несколько измерений с разных датчиков.

Второй путь решения задачи архитектурного устройства представляется возможным при использовании так называемой расширяемой системы. Расширение достигается путем установки в измерительный прибор в специальные разъемы дополнительных плат, каждая из которых работает только со своим датчиком. Это позволит существенно снизить стоимость производства прибора и упростит комплектование устройства.

Функциональная схема разработанного унифицированного измерительного прибора, имеющего несколько каналов для обработки сигналов с датчиков, представлена на рис. 2.

Основным элементом представленной схемы является панельный компьютер. Помимо задач сбора информации с датчиков, осуществления

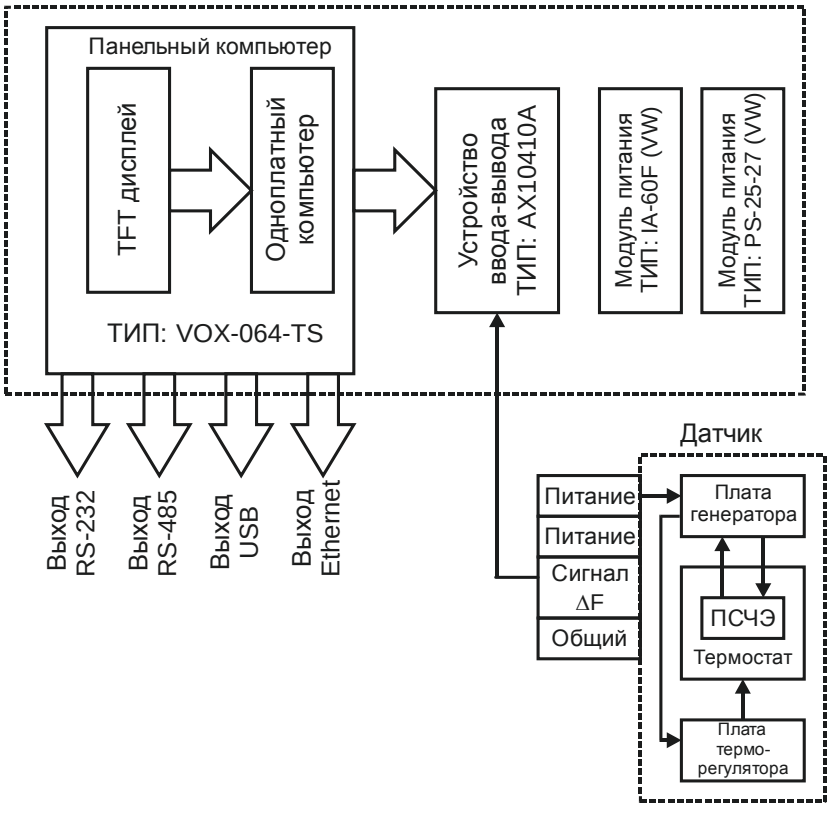


Рис. 2. Функциональная схема унифицированного измерительного прибора

различных вычислений и представления результатов измерений он также выполняет функции управления работой всего прибора (включение и выключение устройства, переключение каналов измерения, регулировка яркости индикации и т. п.).

Через устройство ввода-вывода осуществляется передача измеряемых сигналов от датчиков в панельный компьютер, а также подача питающего напряжения на сами датчики.

Модули питания необходимы для подачи требуемых токов и напряжений для всей схемы прибора.

Так как представленный в статье прибор основан на СЧМ, то на рис. 2 показан только частотный вид сигнала с датчика.

Основные технические и метрологические характеристики разработанного прибора, основанного на СЧМ:

- диапазон измерений влажности газов и жидкостей от 0,5 до 1 000 млн$^{-1}$;
- основная относительная погрешность не более 5 %.

Предлагаемый в данной статье унифицированный измерительный прибор позволяет обрабатывать не только частотные, но и любые другие сигналы с различных датчиков. Единственное требование к таким сигналам – это их нормированные значения, то есть измерительные сигналы должны лежать в любом из следующих диапазонов: 0…5 мА; 0…20 мА; 4…20 мА; 0…10 мВ; 0,01…1 000 кГц.

К основным достоинствам разработанного прибора можно отнести:

- простоту конструкции;
- расширение измерительных возможностей за счет установки дополнительных модулей;
- микропроцессорное управление;
- возможность совершенствования измерительных функций за счет программного управления;
- массогабаритные показатели;
- универсальность в отношении возможности работы в лабораторных и промышленных условиях;
- степень автоматизации процесса измерений;
- возможность работы в составе АСУТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОАО Ангарское ОКБА. [Электронный ресурс] – URL : http://www.okba.ru. (дата обращения 10.05.2011).
2. ОАО Ангарское ОКБА. Гигрометр «Байкал-RG» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.baikal-rg.ru/. (дата обращения 10.05.2011).
3. ИКО «Зеленоград-Информ-Прибор» [Электронный ресурс]. – URL : http://www.ruspribor.ru/index.html. (дата обращения 10.05.2011).
4. Vaisala’s DM500 – Dewpoint Reference Standard with out a Mirror [Электронный ресурс]. –URL : http://www.vaisala.com. (дата обращения 10.05.2011).
5. Компания «Артвик» [Электронный ресурс]. – URL : http://www.artvik.ru. (дата обращения 10.05.2011).
6. Компания MicroMax Systems. [Электронный ресурс]. – URL : http://www.micromax.ru/index.shtml. (дата обращения 10.05.2011).
7. Ivashchenko V. E., Mazur V. G., Tomilin M. A. Application of Sorption-Frequency Method in Comparison with Other Methods for Measurement of Humidity Nanoconcentration in Gases and Liquids // IEEE 2nd Russia School and Seminar MNST. – 2010. – Novosibirsk. – P. 45–47.
8. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 272 с. : ил.

УДК 004.827

Кедрин Виктор Сергеевич,
канд. техн. наук, доцент кафедры менеджмента и торгового дела ИГУ (филиала в г. Братске), доцент кафедры дискретной математики и защиты информации БрГУ,
тел.: (3953)44-89-93, e-mail: kedrinvs@mail.ru

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОБУЧАЮЩЕГО МНОЖЕСТВА В НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

V.S. Kedrin

ALGORITHM OF EVALUATION OF THE OPTIMUM DIMENSIONS OF TRAINING SET IN NEURAL FORECASTING MODELS

Аннотация. *Предложен алгоритм оценки критерия «непротиворечивости» для нахождения размерности входного вектора обучающего множества, позволяющий определять возможность оптимального моделирования сложных динамических процессов на этапах структурного и параметрического синтеза искусственной нейронной сети.*

Ключевые слова: *искусственные нейронные сети, формирование обучающего множества, прогнозирование.*

Abstract. *We propose an algorithm for estimating the criterion of «consistency» for finding the dimension of the input vector of training set, allowing to determine the optimal simulation of complex dynamic processes at the stages of structural and parametric synthesis of an artificial neural network.*

Keywords: *artificial neural networks, forming a training set, prediction.*

Одним из альтернативных активно развивающихся подходов к оценке сложных динамических процессов является их изучение в пространстве временных выборок с помощью непараметрических методов нейросетевого прогнозирования. Преимущество данного подхода состоит в том, что искусственные нейронные сети (ИНС) могут обучаться на основе опыта и прогнозировать предыдущие временные прецеденты на новые случаи. Теоретическим обоснованием здесь может служить теорема Такенса [1], согласно которой, если временной ряд порождается динамической системой, то существует такое число d (соотносящееся с эффективным числом степеней свободы данной динамической системы), что d предыдущих значений временного ряда однозначно определяют следующее значение. Поэтому на предварительном этапе анализа априорной информации обучения по имеющейся выборке данных остается открытым вопрос об определении числа размерности d входного вектора признаков $\mathbf{X}(t)$, позволяющих определить изменение выходного вектора $\mathbf{Y}(t)$. Кроме этого, при создании системы прогнозирования на базе ИНС необходимо принимать во внимание диапазон трансформаций временной выборки [2], что приводит к требованию создания классификатора пар обучения, инвариантного к этим трансформациям.

Учитывая вышеизложенное, можно определить, что на предварительном этапе анализа априорной информации прошлых временных состояний динамической системы необходимо представить ее в виде инвариантных пар обучения и найти оптимальную размерность входного вектора образа $\mathbf{X}(i)$, определяющего выходной вектор образ $\mathbf{Y}(i)$.

В работе [3] рассмотрена методика нейросетевого прогнозирования с помощью элементарных динамических оконных образов, позволяющих инвариантно учитывать трансформацию процесса на этапе обучения. Перейдем к решению проблемы выбора размерности d, соотносящегося с эффективным числом степеней свободы данной динамической системы.

Ввиду отсутствия формального критерия оценки оптимального числа размерности d, определяющего длину по временным отсчетам входных векторов элементарных образов $\{\mathbf{X}(i)\}$ ($i = 1, 2, \ldots, n$), введем требование «противоречивости». Здесь понятие оптимальности характеризует возможность наиболее лучшего описания искусственной нейронной сетью множества выходных векторов элементарных образов $\{\mathbf{Y}(i)\}$ на этапах структурного и параметрического синтеза. При этом требование «противоречивости» основывается на неоднозначности формирования вы-

ходных образов $\{\mathbf{Y}(i)\}$ на совокупность одинаковых воздействий $\{\mathbf{X}(i)\}$. Это требование согласуется с условием, что для оптимального построения прогнозной модели ИНС на этапе структурного синтеза необходимо, чтобы наборы, входящие в состав обучающих входных и выходных множеств, не противоречили друг другу [4]. Таким образом, чем выше противоречивость, тем хуже качества прогнозной модели ИНС.

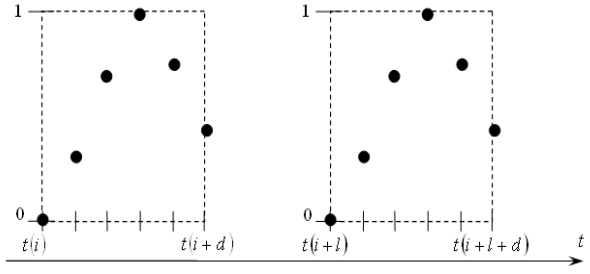


Рис. 1. Два идентичных элементарных оконных образа через временной лаг *l*

Противоречивость возникает, если два входных набора с одинаковым описанием ситуации имеют разные значения выходных наборов. Исходя из данного требования, оценка оптимального числа размерности на базе критерия противоречивости должна осуществляться по следующим этапам:

1. Этап выделения подмножеств $\mathbf{Z}_k$ (k = 1, 2, …, m), в которые входят идентичные друг другу входные элементарные образы (рис. 1).

На рис. 1 представлены два идентичных инвариантных элементарных оконных образа через определенный временной лаг l. Однако на практике вероятность нахождения идентичных образов достаточно низкая, поэтому введем понятие сходных образов.

Всякое измерение имеет определенную точность ε. Элементарный образ $\mathbf{X}(t(i+l))$ является ε-сходным с образом $\mathbf{X}(t(i))$, если точки образа $\mathbf{X}(t(i+l))$ попадают в окрестность точек образа $\mathbf{X}(t(i))$, выполненную с точностью до ε, что не позволяет различить две ε-сходные величины [5, с. 45] (см. рис. 2).

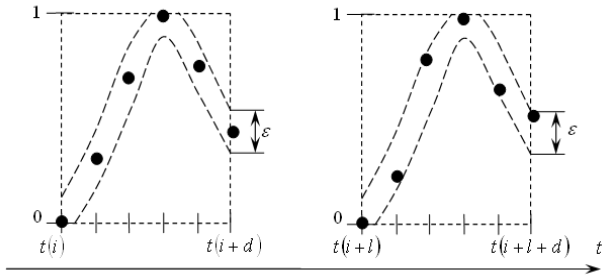


Рис. 2. Два сходных элементарных оконных образа через временной лаг *l*

При этом, чем меньше будет ширина окрестности ε, тем более будут походить друг на друга сходные элементарные образы. В результате осуществления первого этапа в каждом подмножестве $\mathbf{Z}_k$ образуется n_k сходных образов $\mathbf{X}(i_k)$ ($i_k = 1, 2, ..., n_k$) при заданной ширине окрестности ε.

2. Этап оценки противоречивости наборов.

На данном этапе необходимо ввести числовой критерий оценки непротиворечивых наборов для выделенных подмножеств $\mathbf{Z}_k$ сходных элементарных образов. Будем считать набор сходных входных образов $\mathbf{X}(i_k)\leftrightarrow\mathbf{X}(j_k)$ ($i_k \neq j_k$) из подмножества $\mathbf{Z}_k$ противоречивым, если соответствующий им набор выходных образов $\mathbf{Y}(i_k)\leftrightarrow\mathbf{Y}(j_k)$ является несходным в границах окрестности ε (рис. 3, *б*). Если набор выходных образов $\mathbf{Y}(i_k)\leftrightarrow\mathbf{Y}(j_k)$ является сходным в границах окрестности ε, то соответствующий ему набор входных образов $\mathbf{X}(i_k)\leftrightarrow\mathbf{X}(j_k)$ из подмножества $\mathbf{Z}_k$ является непротиворечивым (рис. 3, *а*).

В результате оценки непротиворечивости в каждом подмножестве $\mathbf{Z}_k$ будет выделено g_k противоречивых и h_k непротиворечивых наборов:

$$g_k + h_k = n_k . \qquad (1)$$

Таким образом, на основании данного анализа можно сформировать числовой критерий непротиворечивости выделенных сходных образов в подмножестве $\mathbf{Z}_k$, характеризующий долю непротиворечивых образов:

$$\zeta_k = \frac{h_k}{g_k + h_k} . \qquad (2)$$

Интегральный (общий) критерий непротиворечивости с учетом количества n_k сходных образов $\mathbf{X}(t(i_k))$ в каждом подмножестве $\mathbf{Z}_k$ ($i_k = 1, 2, ..., n_k$) и доли, которую они занимают в общем объеме совокупности сходных образов $\sum_{k=1}^{m} n_k$, можно определить по следующей формуле:

$$\zeta = \sum_{k=1}^{m} \left(\frac{n_k}{\sum_{k=1}^{m} n_k} \left(\frac{h_k}{g_k + h_k} \right) \right). \qquad (3)$$

Как видно из формулы (3), если в каждом подмножестве будут существовать лишь противоречивые наборы (для всех подмножеств $\mathbf{Z}_k$: $h_k = 0$, $k = 1, 2, ..., m$), то общий критерий непротиворечивости ζ будет равен нулю. В случае, если для всех наборов будут существовать лишь непротиворечивые наборы (для всех подмножеств $\mathbf{Z}_k$:

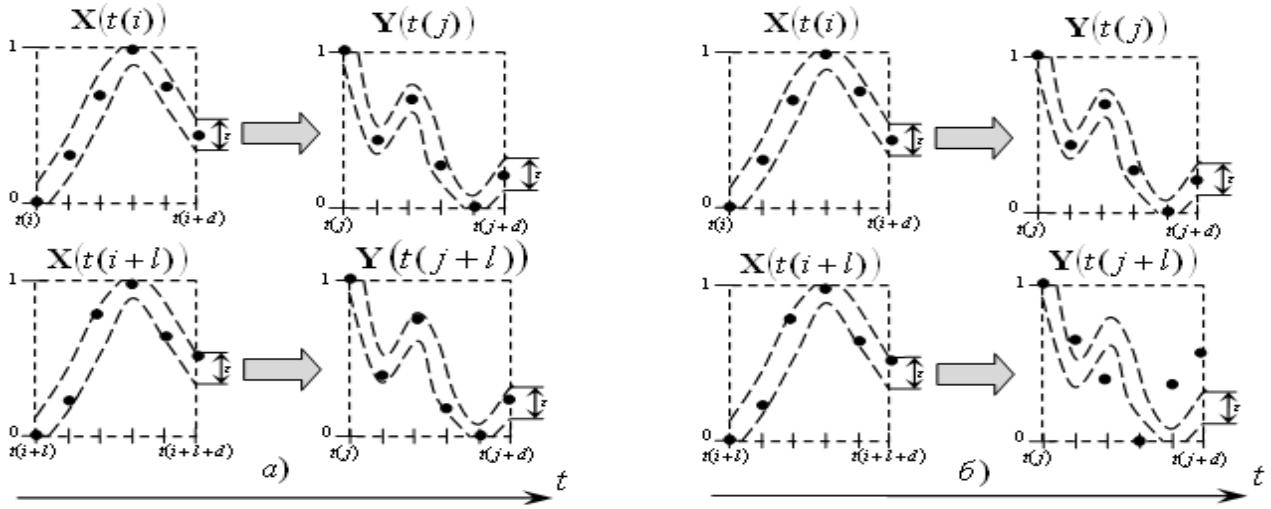


Рис. 3. Оценка противоречивости наборов:
а – непротиворечивый набор; б – противоречивый набор

$g_k = 0$, $k = 1, 2, ..., m$), то общий критерий непротиворечивости ζ будет равен единице.

Сформированный критерий непротиворечивости косвенно характеризует возможность ИНС определять зависимость между входными и выходными выборками (построение оптимальной прогнозной модели). Оценивая изменение критерия ζ в зависимости от числа размерности входного вектора признаков d, можно найти оптимальную размерность d_0, при которой значение критерия непротиворечивости будет максимальным. Следовательно, для такой размерности d_0 нейронная модель на этапах структурного и параметрического синтеза может выделить наиболее оптимальную зависимость $\mathbf{Y} = f(\mathbf{X})$.

Для расчета критерия противоречивости автором составлен компьютерный алгоритм расчета. Исходя из описанных выше этапов, алгоритм расчета критерия непротиворечивости также можно разделить на два частных алгоритма.

Алгоритм 1

Выделение сходных образов. Блок-схема алгоритма 1 представлена на рис. 4.

В представленном на рис. 4 алгоритме блок условия для определения сходных элементарных образов может быть выполнен несколькими способами:

1) На основании Евклидового расстояния.

В этом случае считается, что вектора $\mathbf{X}_i$ и $\mathbf{X}_j$ определяют в евклидовом пространстве R^d пару точек, расстояние между которыми вычисляется по формуле:

$$L(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \left|\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_j\right| = \sqrt{\sum_{s=1}^{d} \left(x_{is} - x_{js}\right)^2}\,. \qquad (4)$$

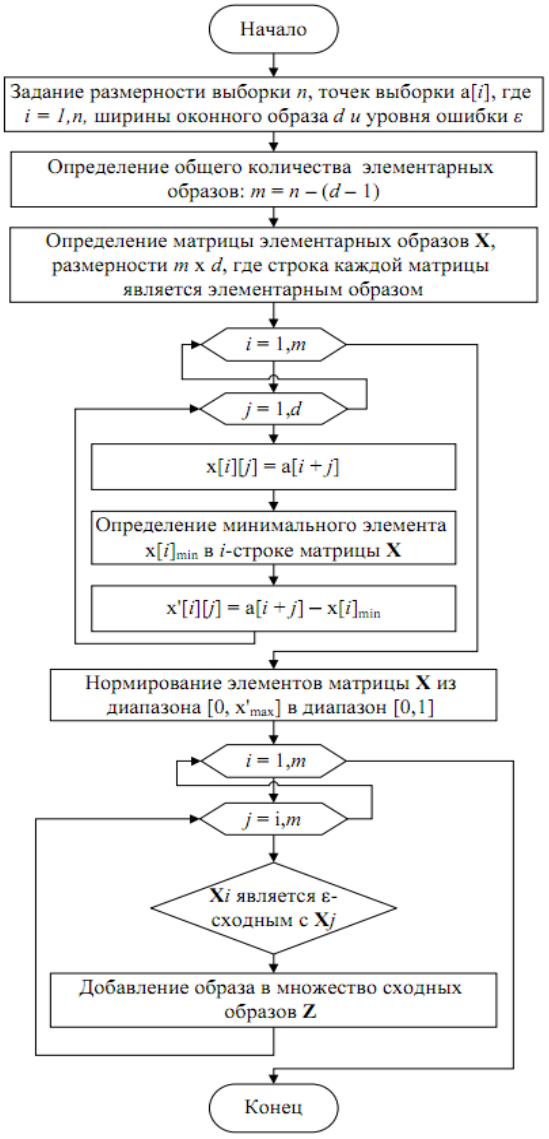


Рис. 4. Алгоритм выделения сходных образов

Между величинами $L(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j)$ и степенью сходства существует обратно пропорциональная зависимость: чем меньше евклидово расстояние между векторами, тем выше степень сходства между двумя векторами.

2) На основании скалярного произведения векторов.

Скалярное произведение векторов определяется по формуле:

$$(\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j) = \mathbf{X}_i^T \mathbf{X}_j = \sum_{s=1}^{d} x_{is} x_{js} . \quad (5)$$

Результат деления скалярного произведения $\mathbf{X}_i^T \mathbf{X}_j$ на произведение длин векторов $\|\mathbf{X}_i\| \cdot \|\mathbf{X}_j\|$:

$$\gamma = \frac{\mathbf{X}_i^T \mathbf{X}_j}{\|\mathbf{X}_i\| \cdot \|\mathbf{X}_j\|} \quad (6)$$

равен косинусу угла между этими векторами. Таким образом, между степенью сходства элементарных векторов и величиной γ существует прямо пропорциональная зависимость: чем ближе величина γ к единице, тем выше степень сходства элементарных векторов.

3) На основании ε-сходности. В этом случае осуществляется проверка модуля разности значений векторов до заданной ширины окрестности ε:

$$\forall (s = \overline{1,d}) : \left| x_{is} - x_{js} \right| \le \varepsilon . \quad (7)$$

Таким образом, между степенью сходства элементарных векторов и модулем разности значений векторов существует обратно пропорциональная зависимость: чем меньше модуль разности значений векторов, тем выше степень сходства между двумя векторами.

Замечание. Данный способ не основан на фундаментальных геометрических соотношениях, как рассмотренные выше два способа, но в расчетном плане он менее затратен, так как требует проведения на каждой итерации меньшего количества вычислительных операций. Поэтому использование третьего способа позволяет оптимизировать представленный на рис. 4 алгоритм.

Алгоритм 2

Определение критерия непротиворечивости.

Представленные алгоритмы 1 и 2 (см. рис. 4 и 5) ориентированы на большое количество вычислительных операций, так как в каждом алгоритме существует два блока двойного цикла, поэтому обработка больших выборок данных может занять значительное время. Одним из направлений оптимизации алгоритмов может стать их объединение для совместного выполнения блоков двойного цикла. Так, формирование элементарных образов для факторного и результирующего признаков (матрицы **X** и **Y** – соответственно) может быть выполнено в одном блоке двойного цикла. Также в блоке определения сходных образов в матрице **X** (см. рис. 4) можно сразу выполнять проверку на непротиворечивость образов в матрице **Y** (см. рис. 5).

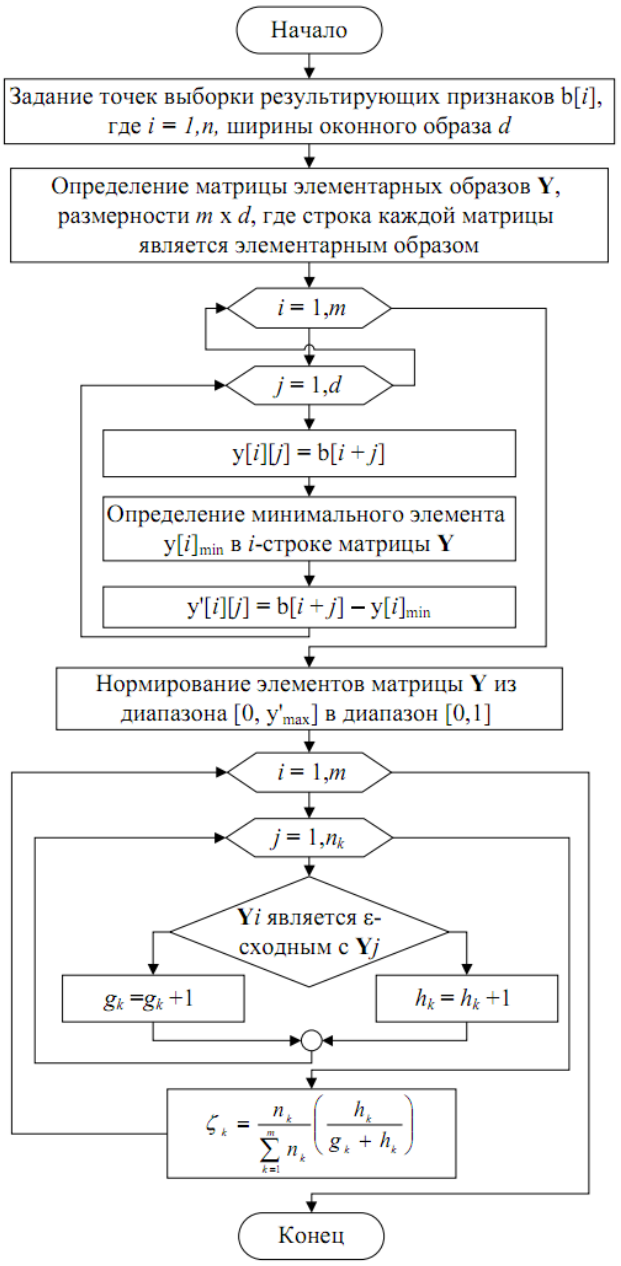


Рис. 5. Алгоритм определения критерия непротиворечивости

Проиллюстрируем возможности применения алгоритма 1 расчета критерия непротиворечивости на следующих примерах.

Пример 1

В качестве исходных данных были выбраны миллисекундные параметры состояния Харанор-

ской ГРЭС (активная мощность P, напряжение U и частота F) за период времени с 13:35:36.000 по 13:38:55:960 на дату 12.01.07, полученные на основании регистраторов системы мониторинга переходных режимов [6]. Выборка данных по каждому параметру составила 10000 значений с дискретностью в 20 мс. Исследование параметров состояния энергетического объекта в указанном диапазоне времени представляет научный интерес. Так, в 13:37:33 произошло отключение энергоблоков на одном из объектов в многосвязной и многосложной энергетической системе, поэтому процессы исследуемых параметров носят ярко выраженный нестационарный характер (см. рис. 6).

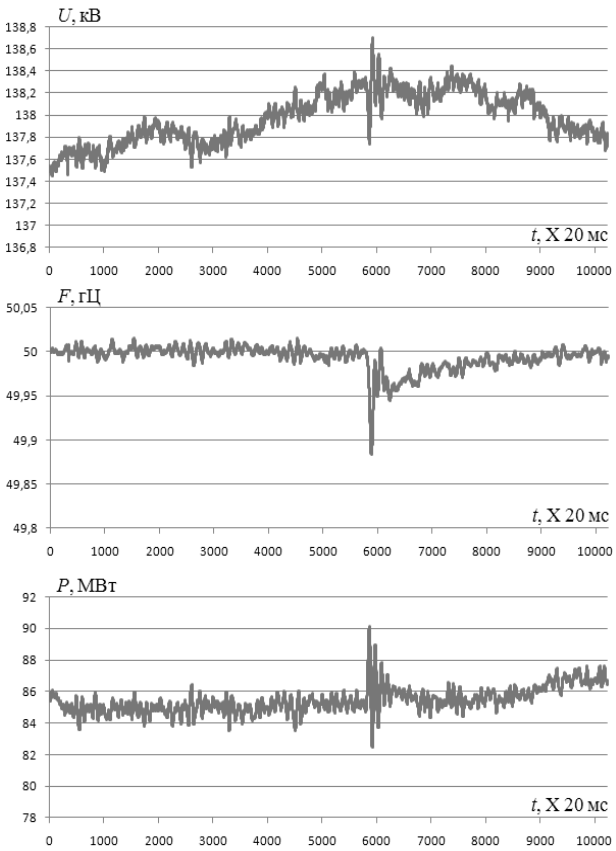


Рис. 6. Параметры состояния Харанорской ГРЭС за период времени с 13:35:36.000 по 13:38:55:960 на дату 12.01.07

Для исследуемых параметров был применен алгоритм нахождения количества сходных образов n в зависимости от ширины оконного образа d и величины окрестности ε. В результате были получены графики, представленные на рисунках 79.

Анализ представленных графиков показал, что в среднем количество сходных образов n увеличивается с ростом величины окрестности ε, что подтверждает сделанное ранее теоретическое предположение об увеличении вероятности нахождения сходных образов при увеличении ширины окрестности ε. Для представленных графиков при $\varepsilon = 0{,}04$ количество сходных образов превышает половину количества формируемых элементарных образов при исследовании всех параметров. Траектории нахождения количества сходных образов n в зависимости от ширины окна d характеризуют интересную динамику, которая особенно ярко проявляется при обработке выборки значений для параметра напряжения U. Видно, что при увеличении ширины окна d количество сходных разов n снижается, однако при достижении некоторых значений ширины окна d происходит

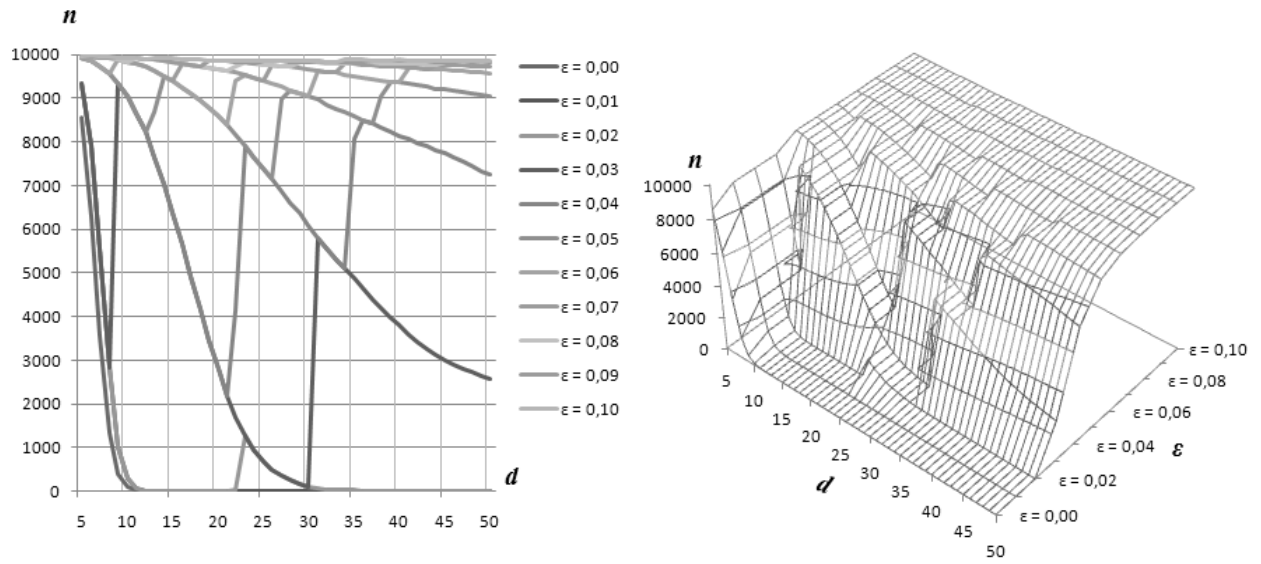


Рис. 7. Характеристика количества сходных образов n для параметра напряжения U в зависимости от ширины окна d и величины окрестности ε

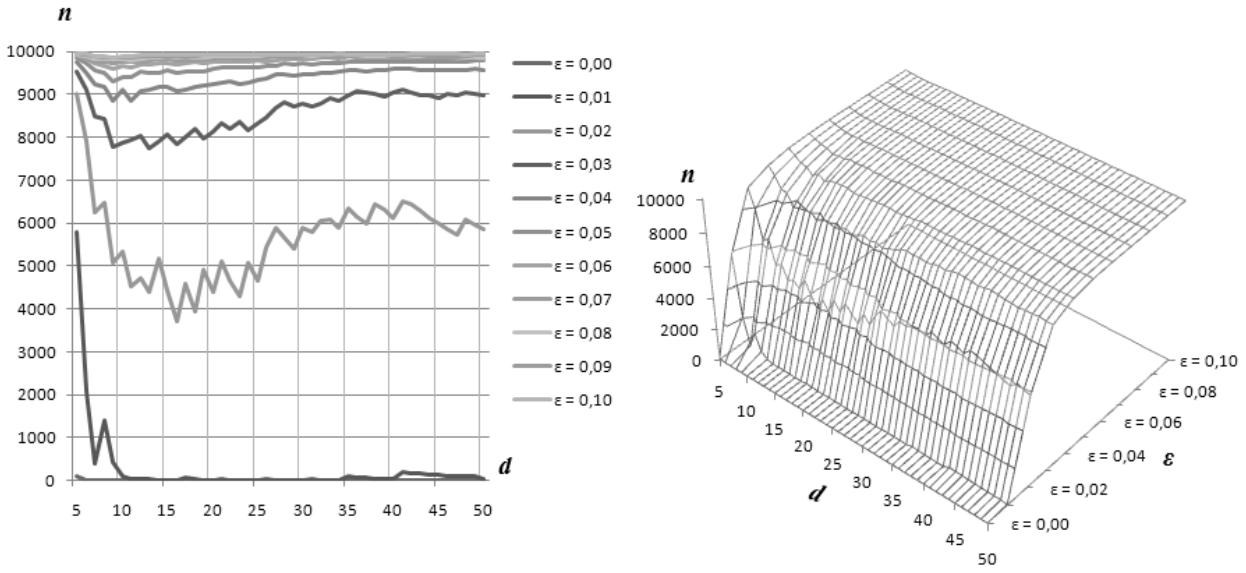


Рис. 8. Характеристика количества сходных образов n для параметра частоты F в зависимости от ширины окна d и величины окрестности ε

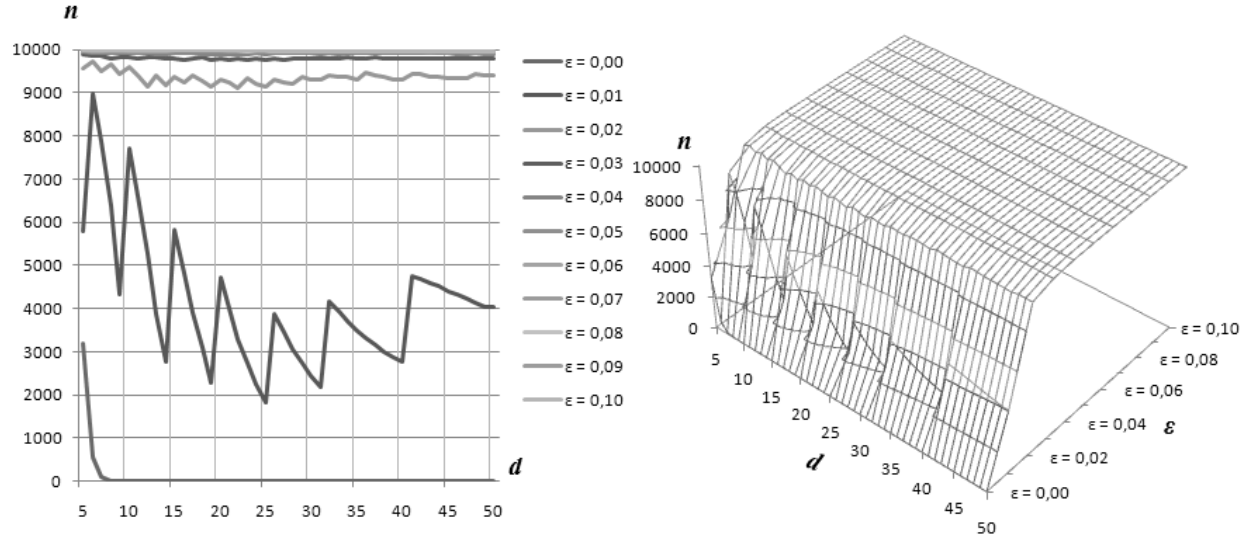


Рис. 9. Характеристика количества сходных образов n для параметра мощности P в зависимости от ширины окна d и величины окрестности ε

резкий скачок и количество найденных сходных образов *n* резко возрастает. Отсюда можно сделать вывод о том, что для некоторых значений длины окне d_0 существует определенная автокорреляционная динамика.

Пример 2

Проиллюстрируем возможности применения алгоритма 2 для определения критерия непротиворечивости для пар параметров U→F и U→P. В результате работы алгоритма были получены графики (см. рис. 10 и 11), характеризующие значение критерия непротиворечивости для наборов элементарных образов в зависимости от ширины окна *d* и величины окрестности *ε*.

Для каждой из траекторий, представленных на графиках (см. рис. 10 и 11), были выделены максимальные значения критерия непротиворечивости ζ' и построены характеристики, отражающие изменение значения максимума критерия непротиворечивости ζ' в зависимости от роста величины окрестности ε для параметров $U \to F$ и $U \to P$ соответственно.

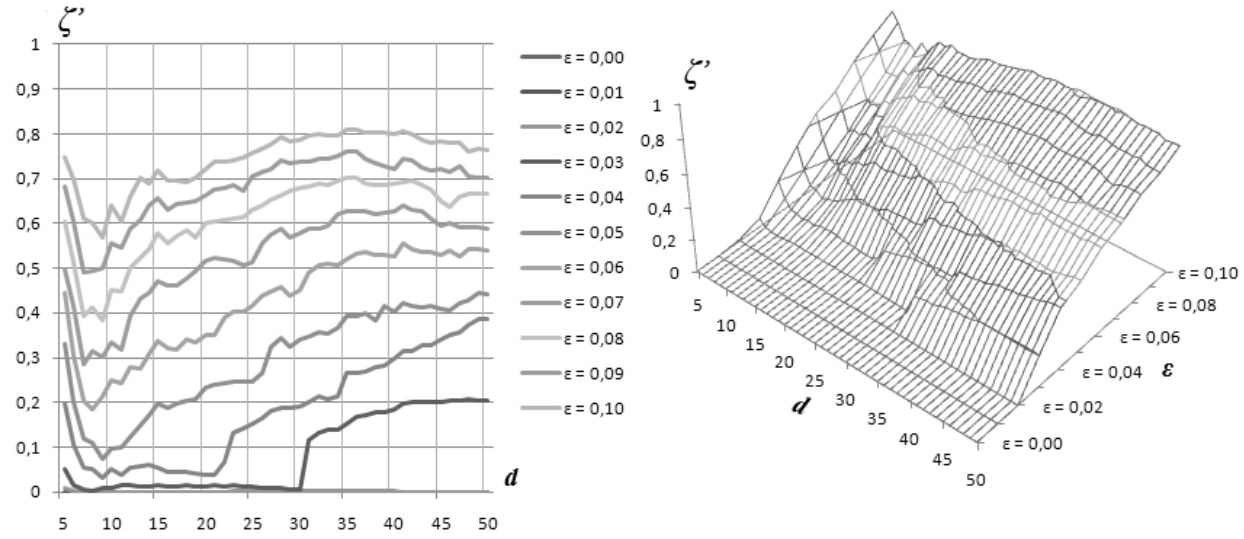


Рис. 10. Расчет критерия непротиворечивости *ζ'* при исследовании параметров *U→F* в зависимости от ширины окна *d* и величины окрестности *ε*

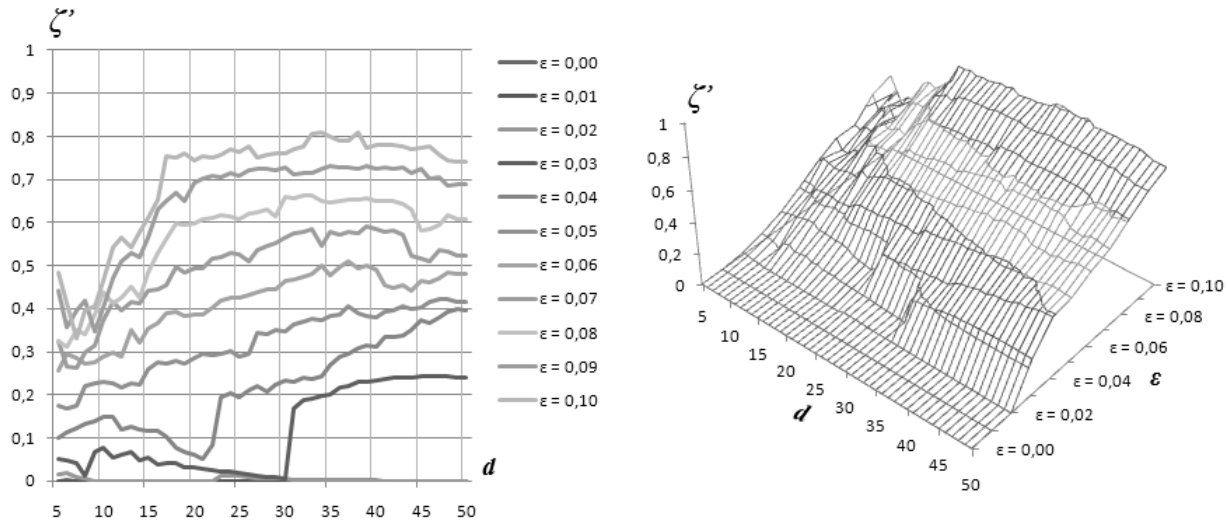


Рис. 11. Расчет критерия непротиворечивости *ζ'* при исследовании параметров *U→P* в зависимости от ширины окна *d* и величины окрестности *ε*

Необходимо заметить, что при расчете критерия непротиворечивости ζ' учитывалась величина, отражающая долю сходных образов в общем объеме образов. С учетом этой величины критерий непротиворечивости ζ' рассчитывался следующим образом:

$$\zeta' = \zeta \frac{\sum_{k=1}^{m} h_k}{\sum_{k=1}^{m} (g_k + h_k)}. \qquad (8)$$

На основании характеристик, полученных на графиках (см. рис. 12), и представленных выше теоретических рассуждениях о критерии непротиворечивости ζ' можно сделать вывод о том, что при маленькой величине окрестности (в диапазоне от 0 до 2 %) может существовать детерминированная зависимость исследуемых параметров при малой ширине элементарного образа (5–6 точек), однако ее вероятность очень мала, так как критерий непротиверечивости ζ' принимает низкое значение (менее 2 %).

С ростом величины окрестности увеличивается вероятность существования стохастической зависимости, что отражает заметное увеличение значения критерия непротиворечивости ζ'. Так, при величине окрестности в диапазоне от 3 до 5 % наиболее вероятна зависимость при ширине окна в диапазоне от 47 до 50 точек.

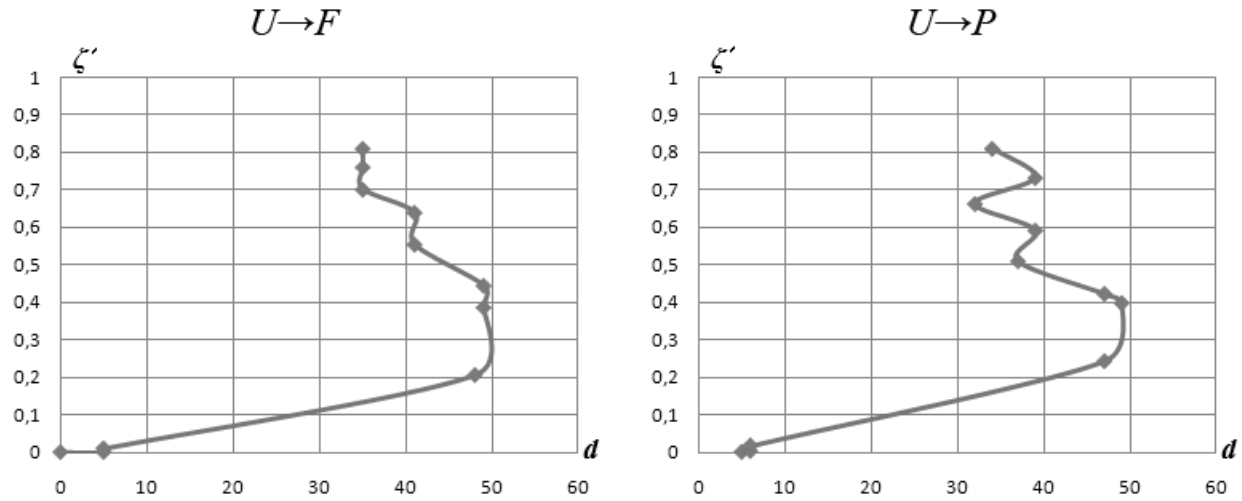


Рис. 12. Изменение максимума значения критерия непротиворечивости *ζ'* при изменении величины окрестности *ε* для пар параметров *U→F* и *U→P* соответственно

При этом критерий непротиворечивости колеблется в диапазоне от 20 до 45 %. При величине окрестности диапазоне от 6 до 10 % наиболее вероятна зависимость при ширине окна в диапазоне от 33 до 41 точки, критерий непротиворечивости колеблется в диапазоне от 50 до 82 %. Отсюда можно сделать вывод о том, что для исследуемых параметров *U*, *P*, *F* при заданной нестационарной динамике (см. рис. 6) возможно построение стохастических нейросетевых моделей прогноза при больших значениях ширины окна.

Таким образом, можно говорить о том, что сформированный критерий непротиворечивости оценивает возможность модели именно прогнозировать, а не моделировать поведение процесса, так как позволяет определить величину ширины элементарного нейросетевого образа, соотносящуюся с эффективным числом степеней свободы исследуемой динамической системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // Lectures Notes in Mathematics. Springer, 1985. P. 99–106.
2. Barnard, E Invariance and neural nets. / E. Barnard, D. Casasent // IEEE Trans. – Neural Networks, 1991. №2 (5). P. 498–507.
3. Дойников, А.Н. Методика прогнозирования динамического состояния многосвязных систем макроэкономики на базе искусственных нейронных сетей / А.Н. Дойников, В.С. Кедрин, М.К. Сальникова // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. №4(12). С. 120-124.
4. Chaudhuri, B.B. Efficient training and improved performance of multilayer perceptron in pattern classification. / B.B. Chaudhuri, B.B. Bhattacharya // Neurocomputing, 2000. №34 (1–4). P. 11-27.
5. Кузьмин О.В. Комбинаторные методы решения логических задач: учеб. пособие. М.:Дрофа, 2006. 187, [5] с. : ил.
6. Аюев Б.И. Перспективные направления использования системы мониторинга переходных режимов ЕЭС/ОЭС./ Б.И. Аюев, Ю.А. Куликов // Информационно-аналитический журнал Энерго-info. 2007. URL: http://www.energo-info.ru/images/pdf/Rele/
7. Session_4/S4-2.pdf (дата обращения 21.07.2007).

УДК 519.6: 622.33

Массель Людмила Васильевна,
д-р. техн. наук, проф., главный научный сотрудник ИСЭМ СО РАН,
тел.:(3952) 42-96-19, e-mail:massel@isem.sei.irk.ru
Такайшвили Людмила Николаевна,
канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИСЭМ СО РАН,
тел.: (3952) 42-35-34, e-mail: luci@isem.sei.irk.ru
Чинь Куанг Чунг,
аспирант ИрГТУ, тел.: +79642156789,
e-mail:09531002@yahoo.com.tw

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИССЛЕДОВАНИЯХ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

L.V. Massel, L.N. Takayshvili, Trinh Quang Trung

SIMULATION IN INVESTIGATION OF DEVELOPMENT OF RUSSIAN COAL INDUSTRY

Аннотация. *В статье рассмотрен подход к имитационному моделированию в исследованиях направлений развития угольной промышленности. Авторами разработана имитационная модель «Балансы», являющаяся одним из компонентов информационно-программного комплекса (ИПК) «Уголь». Использование предлагаемой модели и разработанного ИПК «Уголь» позволяет рассматривать преимущества и недостатки направлений развития угольной промышленности России с учетом различных критериев.*

Ключевые слова*: угольная промышленность, программный комплекс, производство, потребление, баланс, имитационные модели.*

Abstract. *This article describes the simulation approach to investigation of trends of development of the coal industry. Authors have developed a simulation model «Balance», which is one of the components of the information-software package (ISP) «Coal». Usage of the proposed model and developed ISC "Coal" allows considering the advantages and disadvantages of trends of development of the Russian coal industry, subject to the different criteria.*

Keywords: *coal industry, software, production, consumption, balance, simulation.*

Угольная промышленность – одна из ведущих отраслей топливо-энергетического комплекса (ТЭК). Уголь используется как технологическое сырье (в виде кокса) в черной металлургии, химической промышленности (коксовые газы), для производства минеральных удобрений и пластмасс, а также как энергетическое сырье для производства электроэнергии на тепловых электростанциях (ТЭС).

Угольная промышленность в настоящее время включает в себя сотни угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий и снабжает коксующимися и энергетическими углями тысячи потребителей.

В России уголь добывается в 24 субъектах Федерации, а потребляется во всех 89. При рассмотрении потребления угля структурная сложность угольной промышленности проявляется в разобщенности и в выделении групп потребителей, т. е. для энергетических углей – это ТЭС, теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), промышленные и отопительные котельные, обжиговые печи, коммунально-бытовые тепловые установки, газогенераторные установки и прочее; для коксующихся углей – коксохимические заводы. Кроме того, объекты энергетики проектируются обычно в расчете на угли определенного месторождения (определенного качества), и, в силу больших различий в качественных показателях углей, добываемых на разных предприятиях, возможность взаимозаменяемости углей ограничена.

Таким образом, структурная сложность угольной промышленности определяется многочисленностью предприятий, входящих в нее, территориальной и производственной структурой, наличием большого количества внутренних связей, существованием множества направлений использования и различных технологий потребления, поэтому проблема взаимодействия потребителей и производителей, а именно удовлетворения потребностей пользователей в угле нужного качества в требуемых объемах, является очень актуальной в угольной промышленности. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН моделирование этих взаимосвязей выполняется с использованием имитационной модели «Балансы», первая версия которой являлась одним из компонентов МПК «Уголь» [1]. МПК

«Уголь» был реализован в электронных таблицах Excel, такая реализация имеет свои положительные и отрицательные стороны. Поскольку задачи слабо структурируемые и сложно формализуемые, реализация в электронных таблицах Excel позволяет легко перенастраивать и модифицировать модель для конкретных исследований. Таким образом, для каждого исследования создавалась своя модель на основе предыдущих версий [2].

С другой стороны, реализация в электронных таблицах Excel вызывает сложности эксплуатации, так как: в модели для расчетов используется большой объем различных технико-экономических показателей; ошибки, которые возникают при перенастройке формул, сложно контролировать; использование программ, созданных на специализированном для таблиц Excel языке VBA (интерпретатор), требует изменения текстов программ при переходе от использовавшейся версии MS Office к следующей его версии и т. д.

В данной статье рассматривается подход к имитационному моделированию в исследованиях развития угольной промышленности с использованием разработанного авторами, с учетом опыта построения современных программных комплексов для исследований энергетики [3], информационно-программного комплекса (ИПК) «Уголь», включающего следующие компоненты: базу данных «Перспектива развития УП», компонент расчета показателей, программы формирования компьютерных моделей, программы обработки результатов расчетов и математические модели, в том числе усовершенствованную авторами имитационную модель «Балансы».

Использование модели «Балансы» в ИПК «Уголь» дает возможность на основе данных о потенциальных возможностях добычи углей и потребности в углях по субъектам федерации получить прогноз востребованных объемов добычи и поставок углей по субъектам федерации (СФ) и на экспорт и построить диаграммы, иллюстрирующие прогноз.

На рис. 1 представлена общая схема ИПК «Уголь», на рис. 2 – структура модели «Балансы».

В модели «Балансы» выделены три функциональных блока: «Производство», «Потребление» и «Балансы угля». Основным является блок «Балансы угля». Входные данные для этого блока определяются составом выходных данных блоков «Производство» и «Потребление» [4].

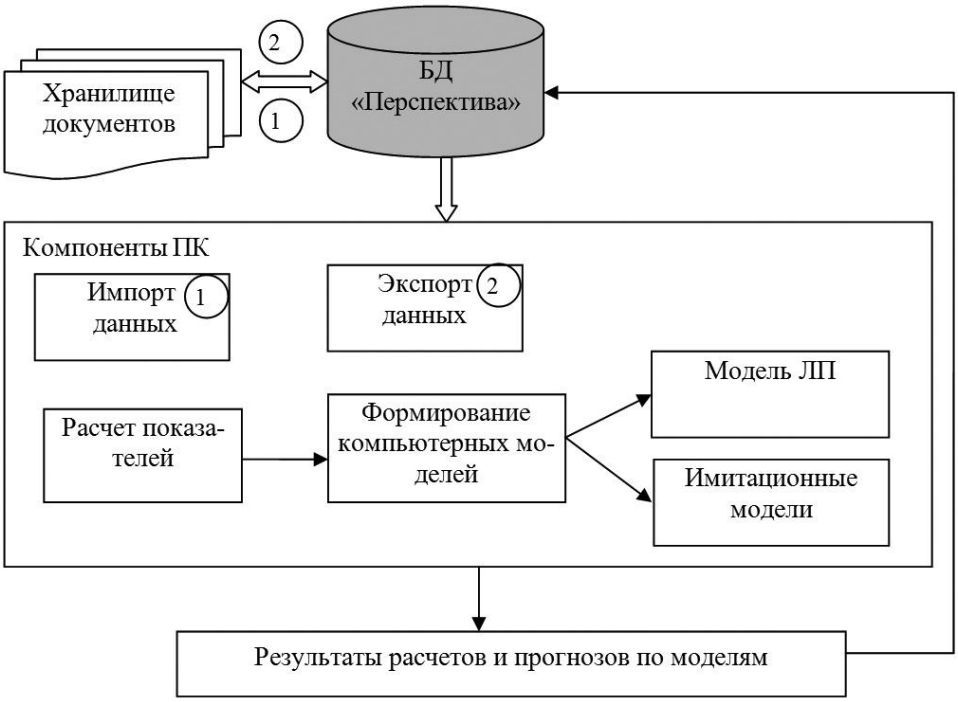


Рис. 1. Общая схема ИПК «Уголь»

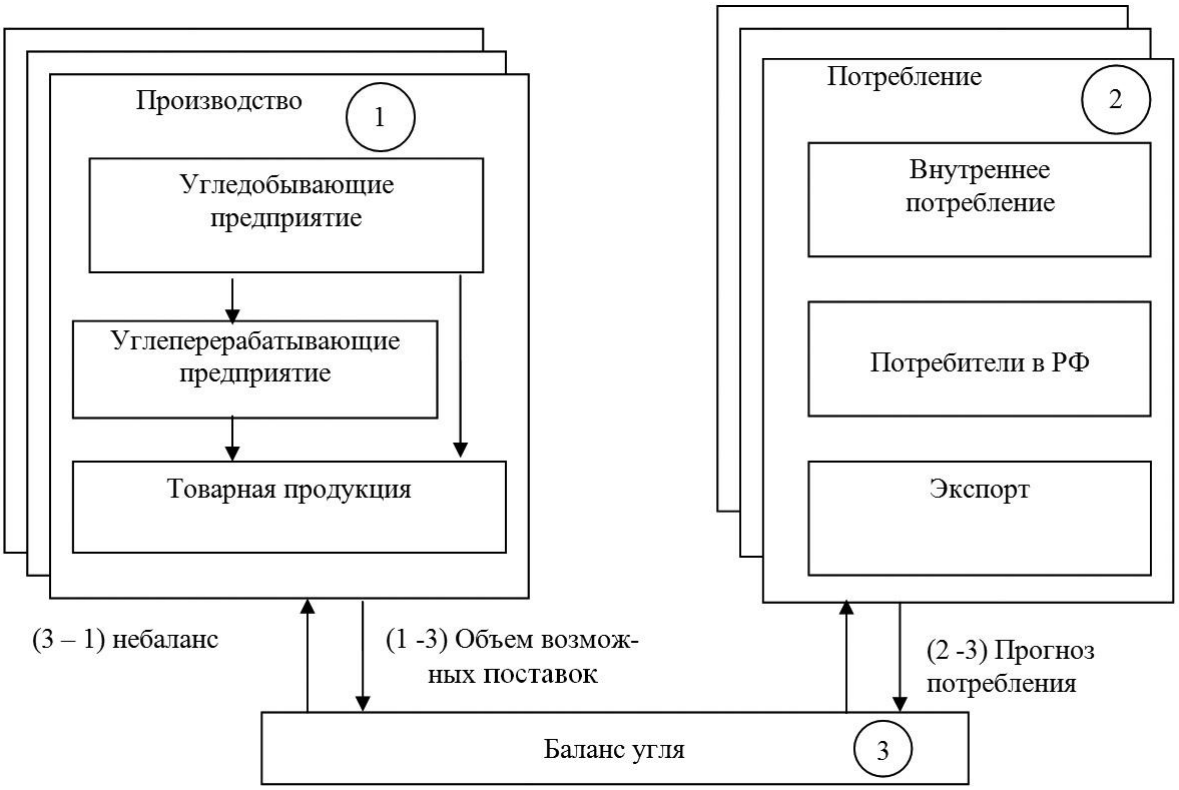


Рис. 2. Структура модели «Балансы»

Блок «Производство»

Выходными данными в этом блоке являются объемы получаемой товарной продукции. Выходные данные структурируются по следующим признакам: объемы добычи угля на шахтах, на разрезах, на действующих предприятиях, на новых предприятиях; объемы добычи угля по районам; объемы добычи по видам углей: бурый, каменный (энергетический, коксующийся); объемы товарной продукции по продуктам (коксовый концентрат, энергетический концентрат, промпродукт, отходы); объемы добычи, поступающие потребителю в рядовом виде для бурого и каменного углей. Возможно структурирование и по другим признакам, например группам предприятий, выделенным по территориальному или административному делению.

Входные данные структурируются соответствующим образом для получения выходных данных и кроме того, содержат: объемы добычи угля, предположительно поступающие на обогатительные фабрики (ОФ) (коксующиеся и энергетические отдельно), коэффициенты выхода товарной продукции и отходов на обогатительных фабриках.

Объемы добычи угля определяются по следующей формуле:

$$D_{sf}^{t} = \sum_{r=1}^{R}\left(\sum_{n=1}^{N}\left(D_{rnк}^{t} + D_{rnэ}^{t\,пер} + D_{rnэ}^{t\,рядкам} + D_{rnэ}^{t\,рядб}\right) + \sum_{a=1}^{A}\left(D_{rak}^{t} + D_{raэ}^{t\,пер} + D_{raэ}^{t\,рядкам} + D_{raэ}^{t\,рядб}\right)\right), \quad (1)$$

где:

sf – индекс субъекта федерации ($sf = \overline{1..SF}$), где SF – число субъектов федерации;

t – индекс периода времени ($t = \overline{1..T}$), где T – число периодов;

r – индекс района ($r = \overline{1..R}$), где R – число районов;

n – индекс нового предприятия ($n = \overline{1..N}$), где N-число новых предприятий;

a – индекс действующего предприятия ($a = \overline{1..A}$), где A – число действующих предприятий;

D_{sf}^{t} – объем добычи углей sf-субъекта федерации в t-м периоде;

$D_{rnк}^{t}$ – объем добычи коксующихся углей на новом предприятии в r-м районе в t-м периоде;

$D_{rn\,э}^{t\,пер}$ – объем углей, получаемых при переработке энергетического угля на новом предприятии в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{rn\,э}^{t\,рядкам}$ – объем каменных энергетических углей, поступающих потребителям в рядовом виде с нового предприятия в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{rn\,э}^{t\,рядб}$ – объем бурых энергетических углей, поступающих потребителям в рядовом виде с нового предприятия в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{ra\,к}^{t}$ – объем добычи коксующихся углей на действующем предприятии в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{ra\,э}^{t\,пер}$ – объем углей, получаемых при переработке энергетического угля на действующем предприятии в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{ra\,э}^{t\,рядкам}$ – объем каменных энергетических углей, поступающих потребителям в рядовом виде с действующего предприятия в *r*-м районе в *t*-м периоде;

$D_{ra\,э}^{t\,рядб}$ – объем бурых энергетических углей, поступающих потребителям в рядовом виде с действующего предприятия в *r*-м районе в *t*-м периоде [4].

Кроме того, существует необходимость выделения предприятий по способу добычи (открытый, подземный). Формула (1) дает представление о возможной структуре добычи, для определенного предприятия большинство составляющих будет равно нулю.

Товарная продукция включает продукты обогащения углей: коксовый концентрат (получаемый из коксующихся углей), энергетический концентрат (получаемый из энергетических углей), промпродукт (из коксующихся и энергетических) и угли, поступающие в рядовом виде потребителям (бурые и каменные) (рис. 2).

Объемы товарной продукции определяются по следующей формуле:

$$T_{sf}^{t}=\sum_{r=1}^{R}\sum_{n=1}^{N}\left(T_{rn\,кк}^{t}+T_{rn\,эк}^{t}+D_{rn\,эр}^{t}+T_{rn\,ПП}^{t}+D_{rn\,б}^{t}\right)+\sum_{r=1}^{R}\sum_{a=1}^{A}\left(T_{ra\,кк}^{t}+T_{ra\,эк}^{t}+D_{ra\,эр}^{t}+T_{ra\,ПП}^{t}+D_{ra\,б}^{t}\right), \quad (2)$$

$$T_{n\,кк}^{t}=\alpha_{n\,кк}*D_{n\,к}^{t\,пер}, \quad (3)$$

$$T_{n\,эк}^{t}=\beta_{n\,эк}*D_{n\,э}^{t\,пер}, \quad (4)$$

$$T_{n\,ПП}^{t}=\alpha_{n\,кПП}*D_{n\,к}^{t\,пер}+\beta_{n\,эПП}*D_{n\,э}^{t\,пер}, \quad (5)$$

где $\alpha_{n\,кк}$, $\beta_{n\,эк}$, $\alpha_{n\,кПП}$ – коэффициенты выхода коксового концентрата, энергетического концентрата и промпродукта на ОФ при переработке угля нового (n) или действующего (a) предприятия, а символами $T_{rn\,кк}^{t}$, $T_{rn\,эк}^{t}$ и $T_{rn\,ПП}^{t}$ обозначены соответствующие объемы выхода товарной продукции.

Объемы товарной продукции подразделяются на ресурсы энергетического угля и ресурсы коксующегося угля. Для получения баланса между потребностью и добычей необходимо ресурсы энергетического угля в тоннах натурального топлива (6) перевести в тонны условного топлива (7).

$$R_{sf}^{эt}=\sum_{r=1}^{R}\left(T_{r\,эк}^{t}+D_{r\,эр}^{t}+T_{r\,ПП}^{t}+D_{r\,б}^{t}\right), \quad (6)$$

$$R_{ysf}^{эt}=\sum_{r=1}^{R}\left(Q_{r\,эк}^{t}*T_{r\,эк}^{t}+Q_{r\,эр}^{t}*D_{r\,эр}^{t}+Q_{r\,ПП}^{t}*T_{r\,ПП}^{t}+Q_{r\,б}^{t}*D_{r\,б}^{t}\right), \quad (7)$$

Ресурсы энергетического угля в натуральном исчислении (6) состоят из объемов продуктов переработки на ОФ (энергетический концентрат и промпродукт) и объемов добычи угля (бурого и каменного), поступающего потребителю в рядовом виде. Ресурсы энергетического угля в условном исчислении (7) получаем умножением каждой составляющей уравнения (6) на калорийный эквивалент (теплотворную способность угля), для каждого угля и товарного продукта – свой.

Блок «Потребление».

Потребление угля включает внутреннее потребление угля для рассматриваемого региона, потребление другими регионами РФ и странами – импортерами угля. Потребители в регионах РФ объединяются по группам: потребители энергетического (объекты энергетики и другие) и коксующегося угля (металлургические заводы). Потребители энергетического угля группируются по направлению использования угля: электростанции, котельные, коммунально-бытовые и прочие потребители [5].

Имеются различные методы для прогноза энергопотребления: полных затрат энергии, прямого счета и структурных изменений. Для расчета потребности в энергетическом угле на котельных и электростанциях предполагается, в основном, использовать метод прямого счета. Для расчета потребности в угле другими группами потребителей будет использоваться набор других методов, а также оценки экспертов.

Кроме того, существует обязательная потребность в определенных углях в регионах, обусловленная технологическими нуждами. Электростанции и котельные на угле проектируются в расчете на уголь определенного качества (проектное топливо).

«Балансы угля».

Получение балансов угля связано с поиском востребованных объемов добычи и поставок углей с учетом определенного критерия развития. В балансовом уравнении (8) представлено соотношение ресурсов к распределению (суммы объемов товарной продукции, получаемой в регионе и объемов ввоза угля в регион) и суммы прогнозируемых объемов потребления и объемов вывоза в другие регионы и на экспорт.

Обобщенное балансовое уравнение имеет следующий вид:

$$T_{sf}^{t} + B_{sf}^{t} = P_{sf}^{t} + V_{sf}^{t} \ , \qquad (8)$$

где:

P_{sf}^{t} – внутреннее потребление *sf*-субъекта федерации в *t*-м периоде;

B_{sf}^{t} – ввоз в *sf*-й субъект федерации в *t*-м периоде;

V_{sf}^{t} – вывоз из *sf*-го субъекта федерации в *t*-м периоде.

Подобные уравнению (8) уравнения составляются и решаются для коксующихся и для энергетических углей отдельно. Для энергетических углей вместо товарной продукции берутся ресурсы энергетического угля в условном исчислении (7) и потребность в энергетических углях в условном исчислении. Для получения востребованных объемов добычи и поставок углей в натуральном исчислении выполняется расчет, обратный представленному в уравнении (7), или деление составляющих на калорийные эквиваленты. Балансы энергетических и коксующихся углей в натуральном исчислении сводятся в общий баланс угля.

Уравнение (8) представлено для субъекта федерации, точно такие же уравнения будут для всех уровней административной структуры страны: районы в субъекте федерации, СФ, федеральный округ (ФО), страна в целом.

Процесс нахождения балансов угля итерационный. На первом этапе в блоке «Балансы» определяется разность между левой и правой частями уравнения (8) и, в зависимости от полученных результатов, возможно одно или несколько действий из следующих.

1. Потребность больше, чем ресурсы угля:
   a) рассматриваем возможности увеличения мощностей добывающих действующих предприятий или ввода новых мощностей;
   b) рассматриваем возможности сокращения поставок на экспорт и в другие регионы;
   c) рассматриваем возможности удовлетворения потребности за счет ввоза из других регионов;
   d) рекомендуем экспертам сократить потребность в угле на объектах (например, сдвинуть сроки ввода мощностей на объектах энергетики).
2. Ресурсы энергетического угля больше, чем потребность в энергетическом угле:
   a) сократить объемы переработки угля;
   b) сократить объемы добычи угля;
   c) сдвинуть на более поздний период ввод новых мощностей по добыче угля.

Кроме представленного анализа, необходим также анализ соответствия потребности в определенных углях возможностям добычи (получения товарного продукта) этого угля, т. к. на объектах энергетики взаимозаменяемости углей практически не существует.

На следующем этапе возвращаемся в блоки «Производство» или «Потребность» для корректировки условий развития и далее итерационно получаем решение.

Поскольку процесс исследования слабоформализуемый, то возможны и другие действия эксперта, в зависимости от конкретного объекта исследования. В качестве объекта исследования может быть выбран любой уровень административного деления страны.

Существует неопределенность в исходной информации, как по возможностям добычи угля, так и по прогнозу потребления угля. Способ преодоления неопределенности – вариантный подход, т. е. решение находится для нескольких возможных сценариев развития экономики региона (страны).

Реализация модели «Балансы»

В соответствии с вышеперечисленными характеристиками модель «Балансы» была реализована в составе ИПК «Уголь» с использованием языка программирования высокого уровня Java и СУБД Firebird 2.0. Интерфейс этой модели представлен на рис. 3.

Выводы

В статье рассмотрен подход к имитационному моделированию в исследованиях направлений развития угольной промышленности, выполняемому с помощью разработанного авторами ИПК «Уголь». Одним из важных компонентов ИПК является модель «Балансы», структура которой представлена в статье.

Использование предлагаемой модели и разработанного ИПК «Уголь» позволяет рассматривать преимущества и недостатки направлений развития угольной промышленности России с учетом различных критериев.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №10-07-00264, №11-07-00192) и гранта Программы Президиума РАН № 2.29.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Такайшвили Л. Н. Разработка имитационной модели прогнозирования развития угледобычи «Балансы» / Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании : тр. X Байкал. всерос. конф. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2005. – С. 313–320.
2. Такайшвили Л. Н. Особенности вычислительного эксперимента исследования развития угольной промышленности в рамках ТЭК // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – Спец. вып. – С. 64–69.
3. Массель Л. В., Воропай Н. И. Интеграция информационных технологий в системных исследованиях энергетики. – Новосибирск : Наука, 2003. – 320 с.
4. Trinh Quang Trung, Takayshvili L.N. Simulation Model for Research of Coal Industry development // Proceedings of International Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT'2009), Crete, Greece, October 5-8. – 2009. – Vol. 1. – P. 85–90.
5. Такайшвили Л. Н. Классификация терминов для формализованного описания предметной области « угольная промышленность в ТЭК» // Информационные и математические технологии в науке и управлении : тр. XIV Байкальской Всерос. конф. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2009. – С. 313–320.

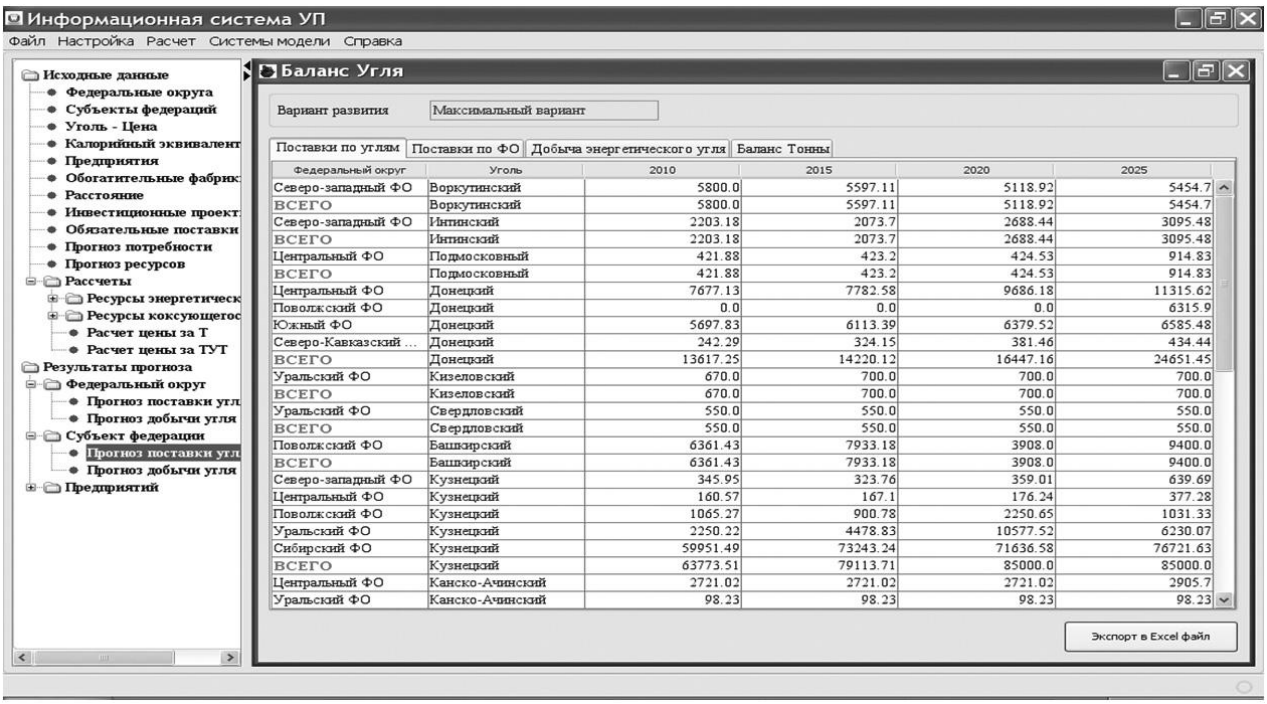


Рис. 3. Интерфейс модели «Балансы» для исследований развития угольной промышленности России

УДК 546.49:551.578

Матафонов Алексей Андреевич,
аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и экологии»
Иркутского государственного университета путей сообщения,
тел.: 63-83-52, e-mail: matafonov@mail.ru
Бычинский Валерий Алексеевич,
старший научный сотрудник, к. г.-м. н., Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
тел.: 42-70-56, e-mail: vbychinskiy@igc.irk.ru
Руш Елена Анатольевна,
д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Безопасность жизнедеятельности и экологии», ИрГУПС
тел.: 63-83-52, e-mail: lrush@mail.ru

ПОЛУЧЕНИЕ НАПЛАВОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

A.A. Matafonov, V.A. Bychinskiy, E.A. Rush

OPPORTUNITIES OF CREATING SPOT WELDING ELECTRODE FOR BRANCHING JUNCTION AND COMPONENT PARTS RESTORATION ON THE RAILWAY TRANSPORT (BASED ON THE EASTERN SIBERIA MINERAL RAW MATERIAL)

Аннотация. *Рассматриваются возможности получения наплавочных электродов для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта на основе минерального сырья Восточной Сибири. Предлагается метод построения физико-химической модели на основе использования программного комплекса «Селектор».*

Ключевые слова: *физико-химическое моделирование, сварочные электроды, минеральное сырье.*

Abstract. *Opportunities of creating spot welding electrode for branching junction and component parts restoration on the railway transport (based on the Eastern Siberia mineral row material) are considered. Method of physical-chemical model building by using programmed complex «Selector» is suggested.*

Keywords: *physical-chemical modeling, spot welding electrode, mineral raw material.*

Большинство деталей железнодорожного транспорта и верхнего строения пути следует отнести к категории ответственных, а такие узлы и агрегаты, как колесные пары, тележки, автосцепки, рельсы, крестовины, – к высокоответственным, требующим при восстановлении специальных материалов. Однако в настоящее время в большинстве случаев для наплавки таких деталей используют выпускаемые в массовом объеме сварочные (не наплавочные) материалы, малопригодные для обеспечения необходимых служебных свойств. Поэтому основной проблемой является разработка новых сварочных материалов. Мировой практикой доказано, что для каждой ответственной детали, работающей в тяжелых эксплуатационных условиях, требуются особые способы сварки и специальные сварочные материалы, обеспечивающие работу этой детали в конкретных парах трения [1].

За последние годы ОАО «ВНИИЖТ» совместно со специализированными организациями разработаны электроды марок АНП-13 и ЭЖТ, предназначенные преимущественно для восстановления узлов и деталей железнодорожного транспорта.

Заводы по изготовлению сварочных электродов в настоящее время находятся в странах СНГ и в Западном регионе РФ, что увеличивает их стоимость при доставке в Восточную Сибирь. В связи с этим появилась необходимость изучения регионального сырьевого комплекса как эффективного средства минимизации затрат на производство сварочных материалов. Многие продукты, заменяющие традиционные компоненты сварочных материалов, могут быть получены из минерального сырья Восточной Сибири [2].

В качестве объекта исследований выбран сварочный электрод марки АНП-13 (ТУ-1272-035-01124328-96), который состоит из стержня из низкоуглеродистой проволоки и покрытия, содержа-

щего следующие компоненты в масс. %: мрамор 10,0–18,0, рутил 12,0–17,0, плавиковый шпат 4,0-8,0, полевой шпат 2,5-4,5, ферромарганец 5,5-7,5, ферросилиций 3,2-5,0, алюминиевомагниевый порошок 0,3-1,0, органические пластификаторы 1,0-1,9, феррохром углеродистый 0,6-1,1, феррованадий 0,05-0,15, железный порошок 50,0-60,0 [3].

При создании электродов марки АНП-13 в качестве шлаковой основы реализована система: $CaCO_3$-TiO_2-CaF_2. Рутил широко применяют при изготовлении сварочных электродов, поскольку в сочетании с металлическими компонентами покрытия он повышает электропроводность, стабилизирует процесс наплавки, а также является шлакообразующим. Повышение его содержания увеличивает вязкость шлака и влияет на качество формирования наплавляемого валика, увеличивая высоту и глубину проплавления. При его высоком содержании образуются оксиды, карбиды и нитриды титана, которые резко снижают вязкость и пластичность наплавленного металла.

Карбонат кальция вводится для создания шлаковой, газовой защиты сварочной ванны от окисления и азотирования, но при избыточном содержании он диссоциирует с образованием CO, что приводит к образованию пор в процессе наплавки. Плавиковый шпат обеспечивает удаление водорода из металла со шлаком. Для раскисления и легирования в виде ферросплавов и порошков вводятся Al, Ti, Mn, V, Si. С целью повышения производительности наплавки добавляется железный порошок. Указанные выше параметры позволяют сформулировать основные требования, предъявляемые к разрабатываемым на основе местного сырья электродам.

Нестандартные электроды, полученные на основе минерального сырья Восточной Сибири (ВСЭ), должны удовлетворять техническим условиям (ТУ-1272-035-01124328-96) и обеспечивать:

- хорошую комбинированную газошлаковую защиту сварочной ванны от воздействия внешней среды;
- устойчивое горение сварочной дуги;
- необходимые условия для качественного формирования шва, легкого отделения шлаковой корки, минимального разбрызгивания металла на угар;
- свойства наплавленного металла, не ниже свойств, получаемых при наплавке электродами типа Э-10Г2СХ по ГОСТ 10052-75 и ТУ-1272-035-01124328-96. Механические свойства наплавленного металла электродов АНП-13.

В настоящее время сварочные электроды создаются на основе экспериментального поиска оптимальной композиции, что требует много времени для того, чтобы получить сварочный материал с требуемыми свойствами. Поэтому интенсивно развиваются расчетные методы построения, электродных покрытий, которые позволяют сократить трудоемкость их разработки [4]. Одним из таких методов является компьютерное термодинамическое моделирование.

Анализ месторождений Восточной Сибири, потенциально пригодных для использования их сырья в качестве компонентов-заменителей в сварочных электродах, описан в работе [2]. В процессе разработки электродов на основе сырья месторождений Восточной Сибири (ВСЭ) использованы: магнезит – Савинское месторождение, мрамор – карьер «Перевал» г. Слюдянка, плавиковый шпат – Абагайтуйское месторождение, периклазовый концентрат – ОАО «Сибирские порошки», ферросилиций – ОАО «Братский завод ферросплавов», алюминиевый порошок – «Иркутский алюминиевый завод».

Получение электродов с качественными физико-химическими и механическими показателями реализовывалось с помощью компьютерного моделирования в программном комплексе «Селектор» по схеме, представленной на рис. 1.

Рабочий список потенциально возможных компонентов, характеризующих систему процесса плавления электродов АНП-13 в равновесии, включает 19 независимых компонентов Al-Si-Fe-Ca-Ti-Na-Cu-Mg-Mn-Cr-V-Zr-O-H-C-K-F-S-P; 75 компонентов газовой фазы, 193 компонента твердых фаз и 49 компонентов расплавленной фазы. Газовая фаза: H, H_2, OH, H_2O, HF, O, CO, CO_2, P_2O_5, SO,SO_2, SO_3, Na_2O, K_2O, H_2O. Шлаковая фаза: авгит ($CaAl_2SiO_6$); альбит ($Na_2Al_2SiO_6$); волластонит ($CaSiO_3$); вюстит (FeO); гематит (Fe_2O_3); герцинит ($FeAl_2O_4$); двуокись циркония (ZrO_2); двухкальцевый феррит ($CaFe_2O_4$); дисиликат калия (K_2SiO_3); ильменит ($FeTiO_3$); калиевый полевой шпат ($K_2Al_2SiO_6$); калиофелит (K_2FeSiO_4); карбонат кальция ($CaCO_3$); кварц (SiO_2); клиноэнстатит ($MgSiO_3$); корунд (Al_2O_3); манганозит (MnO); марокит ($CaMn_2O_4$); окись кальция (CaO); периклаз (MgO); перовскит ($CaTiO_3$); пироксен ($FeSiO_3$); плавиковый шпат (CaF_2); ранкенит ($Ca_3Si_2O_7$); родонит ($MnSiO_3$); рутил (TiO_2); силикат натрия (Na_2SiO_3); сульфат кальция ($CaSO_4$); сульфид железа (Fe_2S); сульфид кальция (CaS); сульфид марганца (MnS); сфен ($CaTiSiO_5$); фосфат кальция (CaP_2O_6). Расплав: C, Fe, V, Cr, Al, Mg, Mn, Si, P, S, SiO_2, FeO, Fe_2SiO_4, Fe_3C, FeS, VO, Al_2O_3, MgO, Ca, CaO, CaF_2, TiO_2, Ti_2O_3, Ti_3O_5.

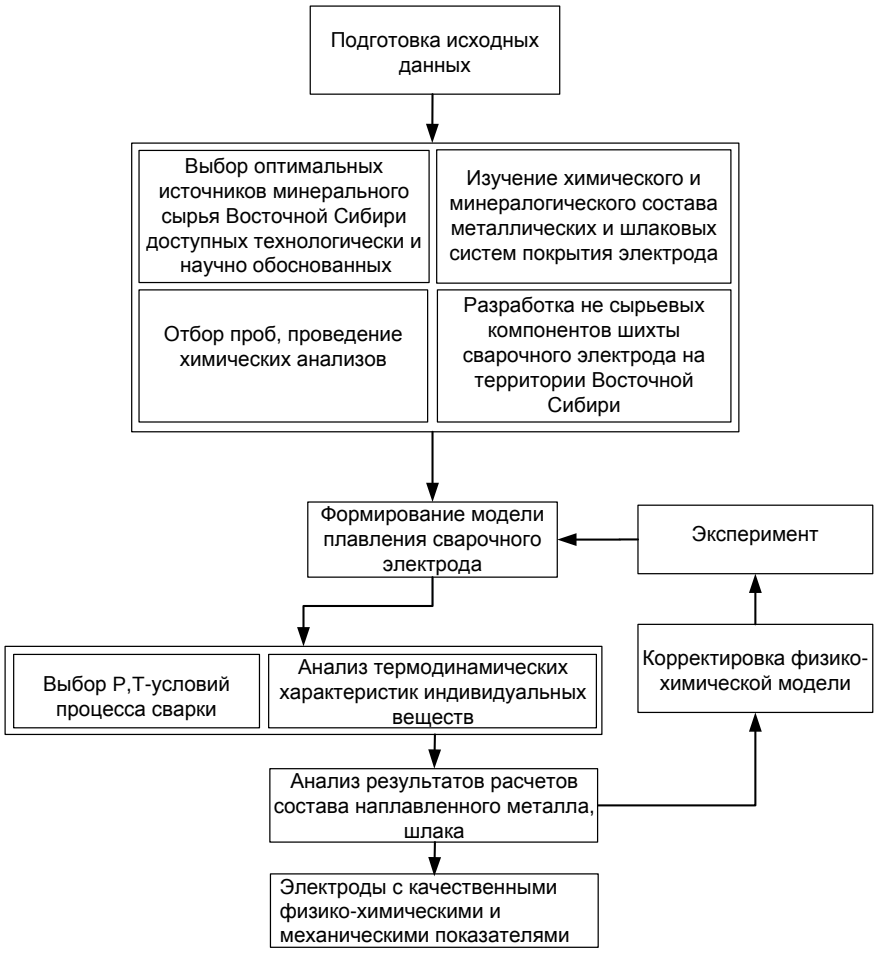


Рис. 1. Последовательность процедур получения сварочных электродов на основе минерального сырья Восточной Сибири

В результате термодинамического моделирования установлено, что химический состав металла электрода АНП-13 удовлетворяет предъявляемым требованиям. Шлаковая фаза по химическому составу незначительно отличается от реальных шлаков. Газовая фаза представлена продуктами высокотемпературного преобразования карбонатов, рутила, калиево-натриевого стекла, плавикового шпата, главным образом CO, CO_2, H_2, HF, SiF_4, Na_2O, K_2O.

Согласно результатам моделирования, электроды ВСЭ по сравнению с АНП-13 характеризуется более низким содержанием CO_2 и увеличением содержания закиси железа в шлаковой фазе. Это подтвердило предположение о неудовлетворительном качестве мраморов с месторождения «Перевал», поэтому в состав покрытия дополнительно был введен магнезит.

Оптимальное соотношение мрамора и магнезита было определено за счет введения в модель, автоматически изменяющегося соотношения мрамора и магнезита в интервале от 0,1 часть мрамора – 0,9 частей магнезита и 0,9 частей мрамора – 0,1 частей магнезита, с шагом 0,1. В результате было определено оптимальное соотношение «мрамор – магнезит» 0,4–0,6 частей соответственно.

Для доказательства полученных результатов были изготовлены электроды ВСЭ, образцам присвоены номера – ВСЭ-1 (исходный) и ВСЭ-2 (откорректированный состав). Наплавку производили на образцы из стали Ст.3 в один слой.

Визуальным осмотром установлено, что на поверхности образцов ВСЭ-1 присутствуют незначительные скопления пор и шлаковых включений. У образцов ВСЭ-2 дефектов не обнаружено, отмечена хорошая отделимость шлаковой корки. Таким образом, корректировка состава покрытия, выполненная за счет введения добавки магнезита в шихту, позволила добиться образования газов более качественного состава, что позволяет оптимально вести процесс сварки с помощью электрода ВСЭ-2.

Исследование экспериментальных электродов ВСЭ-1 и ВСЭ-2 из минерального сырья Восточной Сибири показали:

- Микроструктура металла 3 наплавленных образцов электрода марки ВСЭ-1 (рис. 2) имеет столбчатое строение и состоит из перлита. Феррит располагается по междендритным прослойкам. Наплавленный металл плотный. Несплавлений и микротрещин не обнаружено. В одном из трех исследованных образцов обнаружены шлаковое включение и пора, заполненная шлаком размером менее 0,1 мм (рис. 3). Твердость наплавленного металла HV_{10} 188–201;

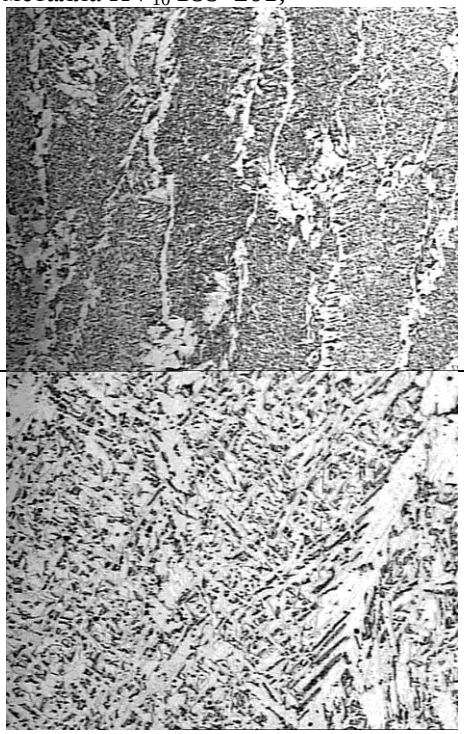


Рис. 2. Микроструктура наплавленного металла электродов ВСЭ-1

- Микроструктура наплавленного металла ВСЭ-2 (рис. 4) мелкодисперсная, имеет столбчатое строение и состоит из перлита и феррита. Наплавленный металл плотный, несплавлений, шлаковых включений, микротрещин и пор в наплавленном металле исследуемых образцов не обнаружено. Твердость наплавленного металла HV_{10} 233–252.

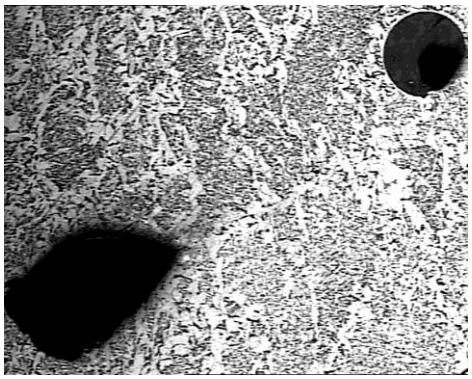


Рис. 3. Микропора и шлаковое включение в наплавленном металле электродами ВСЭ-1, ×100

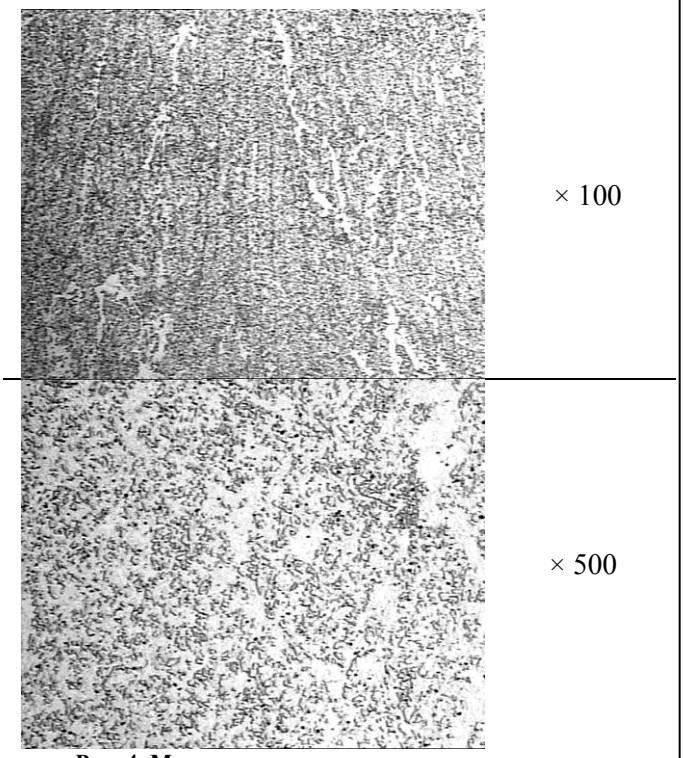


Рис. 4. Микроструктура наплавленного металла электродами ВСЭ-2

Химический анализ шлаков выполнен на рентгенофлуоресцентном спектрометре S4 Pioneer (Bruker AXS, Германия) с рентгенооптической схемой по Соллеру. Для возбуждения флюоресценции использована рентгеновская трубка с анодом из Rh. Рентгеновское излучение регистрируют сцинтилляционный и проточно-пропорциональный счетчики. Результаты аналитических исследований приведены на рис. 5–7. В целом состав фаз, образовавшихся в процессе сварки электрода ВСЭ-1, хорошо соответствует составу фаз, образующихся при использовании электрода АНП-13. Сравнение результатов термодинамического моделирования и химического анализа состава шлаков и наплавленного металла представлено в таблицах 1 и 2.

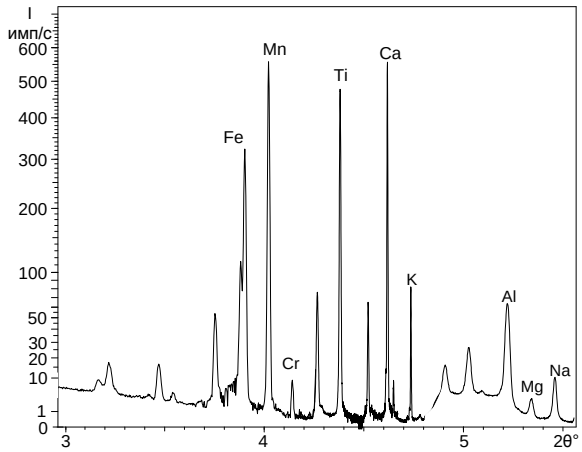


Рис. 5. Аналитические линии элементов сварочного шлака электрода АНП-13

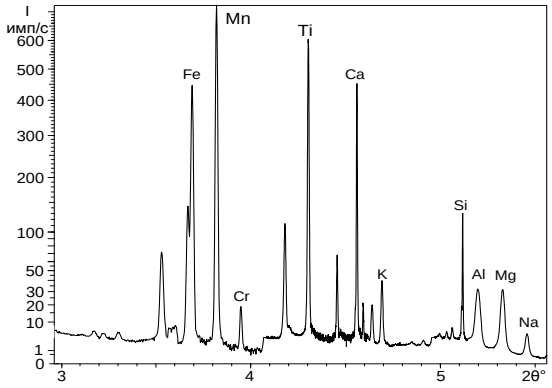


Рис. 6. Аналитические линии элементов сварочного шлака электрода ВСЭ-1

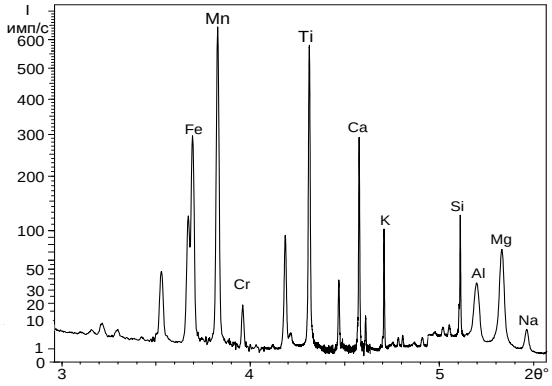


Рис. 7. Аналитические линии элементов сварочного шлака электрода ВСЭ-2

Согласно данным термодинамического моделирования плавления шлаковых систем АНП-13 и ВСЭ в интервале температур 1800–2500 ºС (рис. 8) установлены следующие закономерности. При температуре 1800 ºС происходит полное расплавление электрода. В интервале температур от 1800 до 2000 ºС содержание окислов железа в шлаковой фазе незначительно снижается или остается практически без изменения. Расплавление введенных в состав покрытия интерметаллидов ферромарганца и ферросилиция в интервалах температур 2200–2300 ºС существенно снижает их содержание. Таким образом, при увеличении температуры происходит интенсивный переход железа из металла в шлак. Следовательно, при качественной газошлаковой защите и введении достаточного количества раскислителей процесс снижения содержания окислов железа в наплавленном металле можно оптимизировать. Это подтверждается как экспериментальными исследованиями, так и результатами термодинамического моделирования.

Таблица 1

Сопоставление результатов химического анализа шлаков с результатами термодинамического моделирования (%)

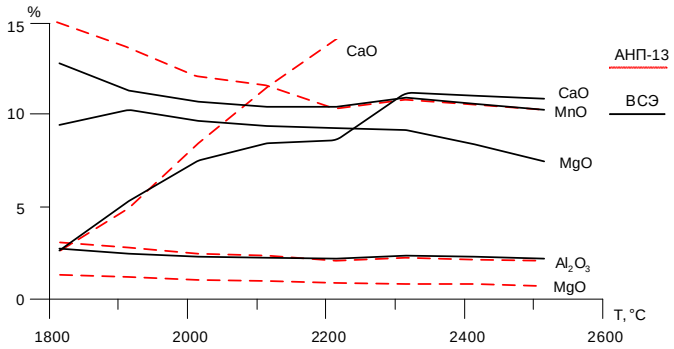
Марка электрода	TiO_2	SiO_2	CaO	MnO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	SO_3
АНП-13[1]	26,33	24,65	22,07	9,77	0.43	4,22	5,56	4,04	2.68	0,26	0,04
АНП-13[2]	27,27	28,04	21,20	5,90	1.06	5,30	2,40	2,10	1.42	0,20	0,04
ВСЭ-1[1]	29,04	21,29	16,43	13,71	4.78	5,97	2,92	1.93	3.48	0,45	0,06
ВСЭ-1[2]	29,46	21,78	16,24	14,20	4.86	5,86	2,86	1.78	3.41	0,30	0,04
ВСЭ-2[1]	29,31	21,63	12,68	12,10	11.18	4,04	3,31	1.92	3.38	0,47	0,10
ВСЭ-2[2]	29,48	21,39	13,14	12,56	11.46	3,94	3,11	1.82	3.26	0,30	0,04

Примечание: 1 – экспериментальные данные, 2 – результаты термодинамического моделирования.

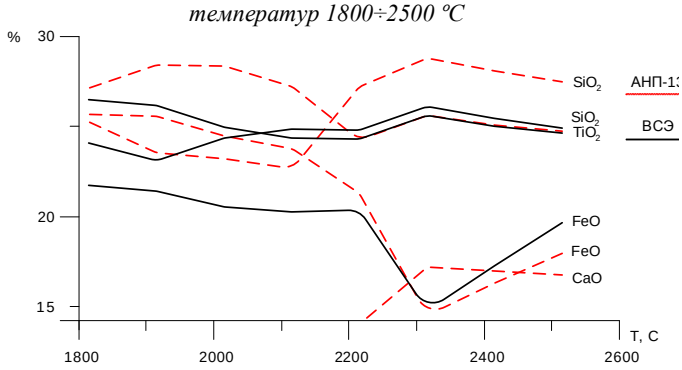
Таблица 2

Сопоставление результатов термодинамического моделирования и химического состава металла, наплавленного электродами марки АНП-13

Марка электрода	Массовая доля элементов,%						
	C	Si	Mn	Cr	V	S	P
АНП-13[1]	≤ 0,15	0,50-0,90	1,8–2,5	0,4–0,6	≤ 0,08	≤0,030	≤0,030
АНП-13[2]	0,08	0,85	2,56	0,84	0,07	0,019	0,024
ВСЭ-1[1]	0,11	0,72	1,86	0,44	0,06	≤0,030	≤0,030
ВСЭ-1[2]	0,08	0,68	2,12	0,84	0,07	0,019	0,024
ВСЭ-2[1]	0,11	0,78	2,34	0,46	0,06	≤0,030	≤0,030
ВСЭ-2[2]	0,08	0,68	3,01	0,84	0,07	0,019	0,024



Распределение CaO-MnO-MgO-Al_2O_3 в интервале температур 1800÷2500 ºС



Распределение SiO_2-TiO_2-FeO-CaO в интервале температур 1800÷2500 ºС

Рис. 8. Результаты термодинамического моделирования шлаковых систем электродов АНП-13 и ВСЭ

Таким образом, результаты термодинамического моделирования имеют высокую сходимость с экспериментальными данными. С помощью термодинамической модели показано, что оптимальный состав шихты электродов ВСЭ обеспечивается за счет замены 0,4 части мрамора на магнезит. За счет этого обеспечивается необходимая шлаковая и газовая защита наплавляемого металла.

Сформированная модель на примере электрода АНП-13 с высокой точностью на качественном и количественном уровне описывает процессы плавления. Достоверность расчетов подтверждена экспериментально. Показано, что термодинамическое моделирование сварочных процессов, протекающих в высокотемпературных интервалах, методом минимизации термодинамических потенциалов в отличие от других расчетных методов, основанных на константах равновесия химических реакций, позволяет определять направление протекания процессов в сварочной ванне, с высокой точностью оценивать равновесный состав гетерогенной системы «газ – шлак – металл».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Березин М. М., Лозинский В. Н. Современное состояние сварочных технологий на железнодорожном транспорте // Вестн. ВНИИЖТ. – 2003. – № 3.
2. Матафонов А. А, Бычинский В. А., Руш Е. А.. Оптимизация состава сварочных электродов на основе физико-химического моделирования. // Вестн. ИрГТУ. – 2010. – № 4.
3. Павлов Н. В., Лозинский В. Н., Кирьяков В. М., Клапатюк А. В. Электрод для ручной дуговой наплавки сталей средней твердости // Патент России № 2104140. 1998.
4. Мойсов Л. П., Бурылев Б. П. Физико-химические основы создания новых сварочных материалов. Ростов н/Д. : Изд-во Рост. ун-та, 1993. – 80 с.

УДК 656.25

Железнов Дмитрий Валерианович,
канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник «Центра станционных технологий» кафедры «Управление процессами перевозок» ЗабИЖТ – филиала ИрГУПС, тел. +7-914-470-9404, e-mail: zheleznov_dim@mail.ru
Светлакова Елена Николаевна,
канд. техн. наук, доцент кафедры «Управление процессами перевозок» ЗабИЖТ – филиала ИрГУПС, тел.: +7-914-460-2492, e-mail: svete75@yandex.ru

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖЕК ПОЕЗДОВ ПРИ ПРОПУСКЕ ЧЕРЕЗ РЕМОНТИРУЕМЫЙ ПЕРЕГОН

D.V. Zheleznov, E.N. Svetlakova

A STATISTICAL RESEARCH OF TRAIN DELAYS WHEN SKIPPING THROUGH THE COUPE RECONSTRUCTED

Аннотация. *В результате исследования процессов, происходящих в период проведения капитального ремонта пути с поездами, пропускаемыми через ремонтируемый перегон, выявлены факторы, влияющие на дополнительные задержки поездов, возникающие из-за недостатка пропускной способности и в ожидании технического осмотра на технических станциях. Установлен характер и вид зависимостей, позволяющие прогнозировать потери в поездной работе.*

Ключевые слова: *пропускная способность, «окна» в графике движения, задержки поездов, капитальный ремонт пути.*

Abstract. *After delays of trains that occur during the overhaul, waiting through the reconstructed block, the factors that affect their value are identified. Trains delay due to two reasons – temporarily lack of bandwidth and waiting for the technical inspection at technical stations. The nature and type of dependences that allow to predict the size of the increase in operating costs are set.*

Keywords: *bandwidth, «window» in the schedule of trains, train delays, path overhaul.*

В конце XX – начале XXI века в связи с изменением технологии производства работ по капитальному ремонту пути и ростом поездопотоков существенно обострилась проблема, связанная с большими простоями поездов в ожидании пропуска через ремонтируемый перегон. Это вызвано тем, что имеющийся резерв наличной пропускной способности участков в условиях роста поездопотока при предоставлении «окон» продолжительностью свыше шести часов не позволяет пропускать все поезда по ограничивающему перегону, в качестве которого в данном случае выступает перегон, на котором производятся работы по капитальному ремонту пути. Для решения задачи сокращения простоя поездов необходимо установить закон их изменения. Зная характер зависимости задержек поездов от различных факторов, можно планировать необходимые мероприятия для их снижения.

Для изучения характера задержек поездов предложена следующая модель: для некоторого полигона сети железных дорог предложен некий план работ капитального ремонта пути.

В качестве объекта исследования предложен полигон *i*-й железной дороги а-А-б-с-д-е-ж-з-и-к-л-Б-м. Станции А-Б – участковые, а, б, с, д, е, ж, з, и, к, л, м – промежуточные. Перегон двухпутный, оборудован односторонней автоблокировкой.

Чтобы установить факторы, влияющие на величину задержек, построены вариантные графики пропуска поездов через ремонтируемый перегон. При этом были выбраны перегоны разной длины, окна различной продолжительности, разные размеры движения и количество временных блокпостов.

Статистические распределения задержек поездов, рассчитанные на основе построенных вариантных графиков, характеризуются наличием значительной вариации в величине. Возникает вопрос о том, какие же причины формируют уровень задержек поездов и какова степень влияния каждой из них. Изучение зависимости вариации признака от окружающих условий составляет содержание теории корреляции [5].

Изучение построенных вариантных графиков движения поездов показывает, что вариация каждого из рассматриваемых факторов находится в тесной связи и взаимодействии с вариацией других признаков, характеризующих исследуемую совокупность. Так, вариация задержек поездов во время проведения работ по капитальному ремонту пути зависит от интенсивности поездопотока, перегонного времени хода, продолжительности «ок-

на», способов движения поездов, соотношений между числом грузовых пассажирских и сборных поездов и других самых разных факторов.

При изучении конкретных зависимостей одни признаки выступают в качестве факторов, обусловливающих изменение других признаков. Их называют факторными признаками [5]. В рамках рассматриваемой задачи в их качестве предлагаются:

- интенсивность поездопотока;
- перегонное время хода грузовых поездов;
- продолжительность «окна»;
- количество временных блокпостов.

Влияние соотношения между числом грузовых, пассажирских и сборных поездов косвенно исследовано через интенсивность поездопотока. В данном случае интенсивность поездопотока – это часовая потребная пропускная способность, определяемая через количество грузовых, пассажирских и сборных поездов и коэффициенты съема. Признаки, которые являются результатом влияния этих факторов, называются результативными. В предлагаемой модели это – суммарные задержки поездов. Так как наблюдается зависимость результативного признака от нескольких факторов, имеет место множественная корреляция. На суммарные задержки поездов оказывает влияние и неравномерность поездопотока, но на данном этапе исследования оценкой этого влияния предлагается пренебречь.

Пусть:

y_1 – суммарные задержки поездов, вызванные недостатком пропускной способности;

x_1 – продолжительность «окна»;

x_2 – интенсивность поездопотока или потребная пропускная способность на участке;

x_3 – количество временных блок-постов;

x_4 – перегонное время хода грузовых поездов.

Тогда

$$y_1 = f(x_1; x_2; x_3; x_4). \qquad (1)$$

Одновременное воздействие на изучаемый признак большого количества самых разнообразных факторов приводит к тому, что одному и тому же значению признака-фактора соответствует целое распределение значений результативного признака, поскольку в каждом конкретном случае прочие факторные признаки могут изменять силу и направленность своего воздействия. При корреляционной зависимости устанавливается тенденция изменения результативного признака при изменении величин факторных признаков [3].

Графическое изображение зависимости суммарных задержек поездов от рассматриваемых факторов представлено на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость суммарных задержек от различных факторов

На рис. 1 явно выражены три сегмента. Большие скачки наблюдаются в точках 22 и 50, что соответствует смене одновременно всех факторов. Внутри каждого сегмента также имеются небольшие скачки, вызываемые изменением интенсивности поездопотока и количества временных блокпостов. Кроме того, наблюдается равномерный рост задержек поездов при увеличении продолжительности «окна» на каждом сегменте от 6 часов до 12.

При исследовании корреляционных зависимостей между признаками решению подлежит широкий круг вопросов [3]:

- предварительный анализ свойств моделируемой совокупности;
- установление факта наличия связи, определение её направления и формы;
- измерение степени тесноты связи между признаками;
- построение регрессионной модели, т. е. нахождение аналитического выражения связи;
- оценка адекватности модели, её экономическая интерпретация и практическое использование.

Важным требованием, обеспечивающим надёжность выводов корреляционного анализа, является требование достаточного числа наблюдений. Для получения статистически значимой модели требуется, чтобы на один фактор приходился объём выборки, равный наблюдениям [2]. Таким образом, при включении в модель четырёх факторов требуется не менее 20 наблюдений, следовательно, объём рассматриваемой выборки (в данной модели 84 наблюдения) позволит обеспечить достаточную надёжность выводов.

Определённые требования существуют и в отношении факторов, вводимых в исследование. Всё множество факторов, оказывающих

влияние на величину результативного показателя, в действительности не может быть введено в рассмотрение, да практически в этом и нет необходимости, так как их роль и значение в формировании величины результативного показателя могут иметь существенные различия. Поэтому при наложении ограничений на число факторов, включаемых в изучение, наряду с качественным анализом целесообразно использовать и определённые количественные оценки, позволяющие конкретно охарактеризовать влияние каждого фактора на результативный показатель. Для этого служат парные коэффициенты корреляции [2].

Парные коэффициенты корреляции рассчитываются по формуле [6]

$$r_{x_j x_к} = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_{ji} \cdot x_{к_i} - \sum_{i=1}^{n} x_{ji} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_{к_i}}{\sqrt{\left[n\sum_{i=1}^{n} x_{ji}^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_{ji})^2\right] \cdot \left[n\sum_{i=1}^{n} x_{к_i}^2 - (\sum_{i=1}^{n} x_{к_i})^2\right]}}, \quad (2)$$

где n – число значений x_j.

$$x_j = (y_1; x_1; x_2; x_3; x_4), \quad (3)$$

$$x_k = (x_1; x_2; x_3; x_4). \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что

$$r_{x_j x_к} = r_{x_к x_j}, \quad (5)$$

$$r_{x_j x_j} = r_{x_к x_к} = 1. \quad (6)$$

Таблица 1

Значения парных коэффициентов корреляции

ryx1	ryx2	ryx3	ryx4	rx1x2	rx1x3	rx1x4	rx2x3	rx2x4	rx3x4
0.4295	0.6268	-0.199	0.1579	0	0	0	0.242	-0.0261	0.3013

Расчеты показали, что все коэффициенты парной корреляции менее 0,7. Это говорит об отсутствии мультиколлинеарности, под которой понимается парная корреляционная зависимость между факторами. Наличие мультиколлинеарности усложняет вычисления при построении модели, снижает точность оценки параметров регрессии и приводит к их ненадёжности [2]. Следовательно, как видно из табл. 1, в исследовании принят рациональный перечень факторов.

Включаемые в исследование факторы должны быть независимы друг от друга, так как наличие тесной связи между ними свидетельствует о том, что они характеризуют одни и те же стороны изучаемого признака и в значительной мере дублируют друг друга. Низкие значения парных коэффициентов корреляции между факторными признаками показывают малую зависимость между ними.

Наиболее сильное влияние на задержки поездов, вызванные недостатком пропускной способности, оказывает интенсивность поездопотока.

Кроме дополнительных задержек поездов из-за недостатка пропускной способности в период проведения капитального ремонта пути появляется ещё одна проблема, связанная с дополнительным простоем поездов на технических станциях в ожидании технического осмотра. Причиной этого является сгущённый подход поездов в период проведения «окна» и после его окончания до тех пор, пока не будут пропущены все снятые поезда. Привлекать дополнительный штат работников ПТО нецелесообразно из-за сезонности данной проблемы.

Выполненный графоаналитическим методом анализ работы трёх технических станций A, B, C при различных размерах движения и количества поездов в пакете позволил сделать ряд выводов:

- задержки поездов определяются следующими факторами: интенсивностью поездопотока; продолжительностью осмотра; количеством одновременно осматриваемых поездов и их числом в пакете;
- с увеличением количества поездов в пакете уменьшаются простои, связанные с недостатком пропускной способности, но возрастают простои в ожидании технического осмотра.

Пусть:

y_2 – дополнительные задержки поездов в ожидании технического осмотра;

x_5 – количество пар поездов в сутки;

x_6 – количество поездов в пакете;

x_7 – количество одновременно осматриваемых поездов;

x_8 – продолжительность технического осмотра.

Тогда

$$y_2 = f(x_5; x_6; x_7; x_8). \quad (7)$$

Результаты выполненного анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения парных коэффициентов корреляции

ryx1	ryx2	ryx3	ryx4	rx1x2	rx1x3	rx1x4	rx2x3	rx2x4	rx3x4
0.084	0.416	-0.795	-0,384	0,029	0,025	-0,108	-0.077	-0.206	0.5017

Низкие значения парных коэффициентов корреляции между факторными признаками показывают низкую связь между ними и отсутствие мультиколлинеарности.

Зависимость задержек поездов в ожидании технического осмотра показана на рис. 2.

Рис. 2. Задержки поездов в ожидании технического осмотра

Как видно из табл. 2, на величину дополнительных задержек поездов в ожидании технического осмотра влияет количество одновременно осматриваемых поездов (т. е. количество бригад осмотрщиков) и количество поездов в пакете. Знак минус в последнем случае указывает на обратный характер зависимости между фактором и результативным признаком, т. е. с увеличением числа бригад осмотрщиков сокращаются суммарные задержки поездов.

Для определения теоретической закономерности изменения задержек поездов от выбранных факторов необходимо выполнить аппроксимацию эмпирического распределения. Критерием выбора оптимального варианта аппроксимирующей функции является минимум среднеквадратических отклонений значений теоретического и эмпирического распределений [1].

Таким образом, характер зависимости задержек поездов, вызванных недостатком пропускной способности, позволил выдвинуть гипотезу о том, что суммарные задержки поездов подчиняются показательному распределению и представлены уравнением вида

$$y_1 = a_0 \cdot a_1^{x_1} \cdot a_2^{x_2} \cdot a_3^{x_3} \cdot a_4^{x_4}, \qquad (8)$$

где y_1 – суммарные задержки поездов;

x_1 – продолжительность «окна»;

x_2 – интенсивность поездопотока или потребная пропускная способность на участке;

x_3 – количество временных блокпостов;

x_4 – перегонное время хода грузовых поездов;

a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты уравнения регрессии;

a_0 – свободный член.

Методом наименьших квадратов определены неизвестные параметры и установлен вид показательной зависимости. Данный метод предусматривает выбор неизвестных коэффициентов регрессии a_1, a_2, a_3, a_4 и a_0, при которых достигается минимум суммы квадратов [1]:

$$\sum_{\kappa=1}^{n}\left[y_\kappa - f(a_1,a_2,a_3,a_4,a_0)\right]^2 = \min\sum_{\kappa=1}^{n}\left[y_\kappa - f_\kappa(a_1,a_2,a_3,a_4,a_0)\right]^2. \qquad (9)$$

Расчёт параметров эмпирического распределения производился в программной среде Microsoft Excel.

Таким образом, зависимость суммарных задержек поездов может быть представлена в виде аналитической зависимости:

$$\sum Nt = 0{,}091 \cdot 1{,}212^{x_1} \cdot 2{,}219^{x_2} \cdot 0{,}555^{x_3} \cdot 1{,}038^{x_4}. \qquad (10)$$

Для анализа общего качества уравнения регрессии использован множественный коэффициент детерминации. Полученный множественный коэффициент детерминации больше 0,7, следовательно, в соответствии с [4], вариация результативного признака – суммарных задержек поездов обусловлена в основном влиянием изменения включенных в регрессионную модель факторов.

Так как уравнение регрессии построено на основе выборочных данных, то возникает вопрос об адекватности построенного уравнения генеральным данным. Для этого проведена проверка статистической значимости коэффициента детерминации на основе F-критерия Фишера. Расчётный критерий (для степеней свободы $l = 79$, $\kappa = 4$) значительно больше табличного, что показывает высокую значимость коэффициента детерминации.

Значимость всех коэффициентов регрессии проверена с помощью t-критерия Стьюдента. Все расчётные показатели t-критерия Стьюдента больше табличных, что также показывает значимость рассчитанных коэффициентов регрессии.

Таким образом, проверка значимости коэффициентов регрессии и коэффициента детерминации подтверждает адекватность полученного уравнения 10 и верность выдвинутой гипотезы о показательном распределении суммарных задержек поездов.

Характер зависимости дополнительных задержек в ожидании технического осмотра позволят выдвинуть гипотезу о том, что это линейная множественная регрессия.

В общем виде уравнение линейной множественной регрессии для четырехфакторной модели имеет вид

$$y_2 = a_1x_5 + a_2x_6 + a_3x_7 + a_4x_8 + a_0. \qquad (11)$$

Методом наименьших квадратов рассчитаны параметры эмпирического распределения и установлен вид зависимости

$$y_2 = 0{,}303x_5 + 6{,}384x_6 - 19{,}611x_7 + 0{,}648x_8 - 6{,}834. \qquad (12)$$

Проведенная проверка показала адекватность полученного уравнения регрессии и верность выдвинутой гипотезы о линейном распреде-

лении задержек поездов в ожидании технического осмотра.

Полученные уравнения позволяют прогнозировать потери, вызванные дополнительными простоями поездов, на этапе планирования «окон», а также использовать эти модели для решения задачи оптимизации продолжительность «окна».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Шульженко П.А. Применение математических методов и вычислительной техники в эксплуатации железных дорог. – М. : Транспорт, 1973. – 184 с.
2. Бережная Е.В., Бережной В.И. Математические методы моделирования экономических систем: Учебное пособие. – М. : Финансы и статистика, 2001. – 368 с.
3. Ефимова М.Р., Петрова Е.В., Румянцев В.Н. Общая теория статистики : Учебник. – М. : ИНФРА, 1998. – 416 с.
4. Макарова Н.В., Трофимец В.Я. Статистика в Excel: Учеб. пособие. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
5. Статистика: Курс лекций. Харченко Л.П., Долженкова В.Г., Ионин В.Г. и др.; Под ред. к.т.н. В.Г. Ионина., – М.: ИНФРА , 1999. – 310 с.
6. Статистические методы обработки эмпирических данных, – М.: ВНИИНМАШ, 1978. – 232 с.

УДК 519.86

Ованесян Сергей Суренович,
д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой статистики и экономического анализа, Байкальского государственного университета экономики и права, г. Иркутск, e-mail: ovanesan@isea.ru
Черхарова Наталья Ивановна,
аспирант кафедры информатики и кибернетики БГУЭП, Читинский институт Байкальского государственного университета экономики и права, тел.: (3022)251622 (дом.), 89644618968 (сот.), e-mail: cherharova_n_i@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ И ВЫПУСКОМ ПРОДУКЦИИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ МОТИВАЦИИ, ЗАВИСИМОГО ОТ НАЛОГОВОЙ ПОЛИТИКИ

S.S. Ovanesyan, N.I. Cherkharova

MANAGEMENT OF COST AND RELEASE PRODUCTS TO ACHIEVE THE REQUIRED LEVEL OF MOTIVATION, DEPENDING ON THE TAX POLICY

Аннотация. *Статья посвящена проблеме управления затратами и выпуском продукции в различных отраслях для достижения требуемого уровня мотивации налогоплательщиков. Авторами предлагается методика для анализа влияния изменения производственных показателей на мотивацию налогоплательщиков. Оценивание экономических показателей осуществляется по основным видам экономической деятельности Забайкальского края.*

Ключевые слова: *налогообложение, мотивация налогоплательщиков, коэффициент мотивации, управление, затраты, выпуск продукции*

Abstract. *The article is devoted problem of management of cost and release products in the different industries to achieve the required level of motivation of taxpayers. The authors offer method for analyzing the effect of change of production indicators on the taxpayers' motivation. Economic indicators are estimated according to main economic activities of the Zabaikalsky region.*

Keywords: *taxation, taxpayers' motivation, motivation factor, management, cost, release products.*

Введение

Устойчивое и динамичное развитие экономики любой страны непосредственным образом связано со сложившимся состоянием и эффективностью функционирования налоговой системы. В условиях рыночной экономики налоговая система должна преследовать не только количественные

(фискальные), а, прежде всего, качественные цели – формировать эффективный налоговый механизм, который наряду с обеспечением налоговых поступлений в бюджеты всех уровней, в тоже время в максимальной мере регулировал бы развитие рыночной экономики.

Необходимость удовлетворения растущих потребностей человека и общества в целом обуславливает постоянное возобновление производства в увеличивающихся масштабах, которое невозможно без инвестиций, развития научно-технического потенциала страны. Возможности хозяйствующих субъектов осуществлять долгосрочные вложения капитала с целью расширения производства напрямую зависят от уровня налоговых изъятий.

Постановка задачи

Налоговая нагрузка многих российских товаропроизводителей на практике продолжает оставаться высокой, что осложняет мобилизацию факторов экономического роста, не способствует росту инвестиционной активности, не стимулирует финансирование разработок новых видов продукции и новых технологий, снижает конкурентоспособность отечественной продукции. Сегодня российская экономика по-прежнему испытывает трудности, связанные со значительной долей убыточных предприятий, неравномерным распределением налогового бремени, уклонением многих субъектов рынка и сфер бизнеса от налогообложения. Все эти факты свидетельствуют о неэффективности налоговой системы России и ее неадекватности проводимым рыночным преобразованиям. Оптимально построенная налоговая система должна, с одной стороны, обеспечить финансовыми ресурсами потребности государства, а с другой стороны, не только не снижать стимулы налогоплательщика к предпринимательской деятельности, но и обязывать его к постоянному поиску путей повышения эффективности хозяйствования. Поэтому, вырабатывая налоговую политику, законодатели должны большее внимание уделять мотивационной стороне налогообложения, конструктивно оценивать потенциальную реакцию налогоплательщиков.

Построение модели

С целью изучения мотивации предприятий-налогоплательщиков предлагается ввести в рассмотрение так называемый «коэффициент мотивации», равный отношению чистой прибыли к той части вновь созданной стоимости, которая делится между предприятием и государством [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$\frac{P}{N+P} \geq K, \qquad (1)$$

где P – чистая прибыль предприятия, N – сумма всевозможных налогов, начислений, отчислений и прочих платежей, обязательных по налоговому законодательству, K – коэффициент мотивации.

Определим входящие в соотношение величины:

$$N = N_{ДС} + N_{ПР} + N_{\beta} + A,$$
$$N_{ПР} = \alpha_{ПР} D,\ P = (1-\alpha_{ПР})D,$$
$$N_{ДС} = \alpha_{ДС}(C-M),\ N_{\beta} = \beta Z,$$
$$A = \alpha_0 C,\ D = (1-\alpha_{ДС})(C-M) - (1+\beta)Z.$$

Здесь $N_{ДС}$ – величина налога на добавленную стоимость;

$N_{ПР}$ – величина налога на прибыль;

N_{β} – величина начислений на заработную плату;

A – остальные налоги и сборы, обязательные по налоговому законодательству;

$\alpha_{ДС}$ – ставка налога на добавленную стоимость;

$\alpha_{ПР}$ – ставка налога на прибыль;

β – ставка начислений на заработную плату;

α_0 – налоговая ставка прочих налогов;

C – цена продукции;

M – материальные затраты на производство продукции;

Z – заработная плата на производство продукции;

D – налогооблагаемая прибыль.

После подстановки всех составляющих в (1) основное соотношение принимает вид [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]:

$$K \leq \frac{(1-\alpha_{ПР})[(1-\alpha_{ДС})(C-M) - (1+\beta)Z]}{C(1+\alpha_0) - M - Z}. \qquad (2)$$

С помощью неравенства (2) можно рассчитать предельные значения каждого показателя при условии, что остальные установлены или заданы вне зависимости друг от друга:

$$C \geq M + \frac{Z[(1-\alpha_{ПР})(1+\beta) - K] + KM\alpha_0}{(1-\alpha_{ПР})(1-\alpha_{ДС}) - K(1+\alpha_0)}, \qquad (3)$$

$$M \leq C - \frac{Z[(1-\alpha_{ПР})(1+\beta) - K] + CK\alpha_0}{(1-\alpha_{ПР})(1-\alpha_{ДС}) - K}, \qquad (4)$$

$$Z \leq \frac{(C-M)[(1-\alpha_{ПР})(1-\alpha_{ДС}) - K] - KC\alpha_0}{(1-\alpha_{ПР})(1+\beta) - K}, \qquad (5)$$

$$\alpha_{ПР} \leq \frac{(C-M-Z)(1-K) - \alpha_{ДС}(C-M)}{C-M-Z-\alpha_{ДС}(C-M)-\beta Z} - \frac{\beta Z + KC\alpha_0}{C-M-Z-\alpha_{ДС}(C-M)-\beta Z}, \qquad (6)$$

$$\alpha_{ДС} \le \frac{(C-M-Z)(1-K-\alpha_{ПР})}{(C-M)(1-\alpha_{ПР})} - \frac{(1-\alpha_{ПР})\beta Z + KC\alpha_0}{(C-M)(1-\alpha_{ПР})}, \quad (7)$$

$$\beta \le \frac{(C-M-Z)(1-K-\alpha_{ПР})}{(1-\alpha_{ПР})Z} - \frac{\alpha_{ДС}(C-M)(1-\alpha_{ПР}) + KC\alpha_0}{(1-\alpha_{ПР})Z}, \quad (8)$$

$$\alpha_0 \le \frac{(C-M-Z)(1-\alpha_{ПР}-K)}{KC} - \frac{(1-\alpha_{ПР})[\alpha_{ДС}(C-M)+\beta Z]}{KC}. \quad (9)$$

Далее приведем расчетные формулы, с помощью которых будем оценивать величины изменения показателей производственной деятельности предприятий для вывода отрасли на требуемых уровень мотивации $K = k$:

$$\Delta C^* = \frac{C^* - C_{факт}}{C_{факт}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

$$\Delta M^* = \frac{M^* - M_{факт}}{M_{факт}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

$$\Delta Z^* = \frac{Z^* - Z_{факт}}{Z_{факт}} \cdot 100\%, \quad (12)$$

где $C^* = C(k)$, $M^* = M(k)$, $Z^* = Z(k)$ определены по формулам (3)–(5), а $C_{факт}$, $M_{факт}$ и $Z_{факт}$ – фактические значения выпуска продукции, материальных затрат и расходов на оплату труда.

С помощью данных параметров налогоплательщик может определить величины изменения выпуска (цены на единицу) продукции (ΔC^*), материальных затрат (ΔM^*) или расходов на оплату труда (ΔZ^*) для достижения требуемого уровня мотивации, создаваемой налоговой политикой.

Данная методика применена к условиям Забайкальского края. Оценивание экономических показателей осуществляется на основе данных управления федеральной налоговой службы и комитета статистики по Забайкальскому краю [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

В табл. 1 приводятся указанные величины для выхода отраслей региона на уровень мотивации равный 0,2 и 0,5.

Таблица 1

Управление затратами и выпуском продукции на предприятиях региона по отраслям

Вид деятельности	K_{2009}	Заданный уровень мотивации					
		$k = 0{,}2$			$k = 0{,}5$		
		ΔC^*	ΔM^*	ΔZ^*	ΔC^*	ΔM^*	ΔZ^*
Всего	-	48,57	-69,43	-61,79	146,17	-182,00	-88,13
Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство	-	28,86	-35,21	-61,55	78,41	-90,16	-85,76
Сельское хозяйство, охота и предоставление услуг в этих областях	-	37,83	-42,11	-78,83	83,62	-90,24	-91,93
Лесное хозяйство, лесозаготовки и предоставление услуг в этих областях	0,28	-5,49	10,59	12,86	55,37	-89,59	-59,17
Добыча полезных ископаемых	0,02	7,87	-12,47	-17,60	74,16	-98,00	-75,30
Добыча топливно-энергетических полезных ископаемых	0,22	-1,53	2,81	3,47	57,94	-91,21	-61,37
Добыча каменного угля, бурого угля и торфа	0,38	-18,72	37,59	59,45	51,14	-73,16	-62,95
Добыча урановой и ториевой руд	0,15	2,89	-5,19	-6,14	65,05	-100,63	-64,78

Таблица 1 (продолжение)

Добыча полезных ископаемых, кроме топливно- энергетических	-	23,17	-29,97	-50,54	102,53	-105,79	-97,08
Добыча металлических руд	-	22,48	-29,33	-49,02	102,82	-106,44	-96,80
Обрабатывающие производства	0,11	3,71	-5,53	-10,11	56,64	-72,52	-72,13
Производство пищевых продуктов, включая напитки и табак, из них	0,23	-1,27	1,71	5,14	43,37	-48,74	-79,75
Производство пищевых продуктов, включая напитки	0,25	-2,02	2,74	8,24	34,35	-41,19	-67,40
Производство мяса и мясопродуктов	0,41	-8,86	11,68	57,94	10,97	-13,55	-36,56
Производство молочных продуктов	0,32	-5,52	8,63	18,16	26,56	-39,31	-45,03
Производство продуктов мукомольно-крупяной промышленности	-	9,20	-9,04	-122,70	97,89	-56,16	-414,80
Производство прочих пищевых продуктов	0,19	0,58	-0,97	-1,41	37,49	-61,80	-48,80
Производство напитков	0,13	4,10	-5,81	-12,24	96,23	-91,82	-105,30
Текстильное и швейное производство	-0,75	19,72	-36,38	-30,11	76,83	-139,92	-63,02
Обработка древесины и производство изделий из дерева	0,32	-8,86	15,21	26,94	44,44	-62,68	-60,42
Целлюлозно-бумажное производство; издательская и полиграфическая деятельность	-0,64	30,90	-91,76	-31,78	136,16	-363,57	-68,52
Издательская деятельность	-0,53	32,34	-130,34	-30,08	150,02	-537,86	-67,54
Полиграфическая деятельность и предоставление услуг в этой области	-0,81	29,54	-70,27	-33,76	123,34	-266,48	-69,66
Химическое производство	-0,01	13,97	-53,47	-15,90	110,62	-377,17	-61,02
Производство резиновых и пластмассовых изделий	-0,27	14,94	-26,93	-25,12	76,51	-128,73	-65,35
Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	0,27	-3,68	6,42	9,41	40,00	-64,39	-51,36
Производство изделий из бетона для использования в строительстве	-0,13	8,92	-12,84	-22,65	53,73	-71,35	-68,52

Таблица 1 (продолжение)

Металлургическое производство и производство готовых металлических изделий	0,23	-1,11	1,55	4,06	30,34	-39,58	-56,53
Металлургическое производство	-0,01	11,85	-25,89	-17,93	99,35	-182,12	-68,61
Производство электрооборудования, электронного и оптического оборудования	0,07	8,36	-27,72	-10,69	83,48	-262,31	-55,04
Производство транспортных средств и оборудования	-0,21	12,03	-17,16	-28,71	70,54	-86,80	-79,01
Прочие производства	0,33	-8,34	13,37	28,46	35,28	-48,60	-56,27
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	0,11	2,41	-3,05	-10,30	31,68	-37,14	-68,30
Производство, передача и распределение электроэнергии	-0,37	5,95	-6,96	-29,03	27,41	-30,99	-70,35
Распределение газообразного топлива	-0,10	9,30	-14,00	-21,67	60,38	-82,36	-69,35
Производство, передача и распределение пара и горячей воды (тепловой энергии)	0,19	0,27	-0,34	-1,29	29,15	-33,51	-69,16
Сбор, очистка и распределение воды	-0,18	13,08	-25,12	-21,43	71,61	-131,64	-61,09
Строительство	-	18,23	-21,44	-54,93	59,30	-63,93	-89,12
Оптовая и розничная торговля; ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного потребления	0,24	-3,31	10,00	5,20	71,94	-189,77	-53,67
Торговля автотранспортными средствами и мотоциклами, их техническое обслуживание и ремонт	-	33,10	-64,81	-40,36	136,32	-227,92	-77,23
Оптовая торговля, включая торговлю через агентов, кроме торговли автотранспортными средствами и мотоциклами	0,47	-32,15	96,91	92,74	9,99	-26,52	-13,81

Таблица 1 (окончание)

Розничная торговля, кроме торговли автотранспортными средствами и мотоциклами; ремонт бытовых изделий и предметов личного пользования	-0,18	23,69	-124,01	-22,65	142,87	-650,74	-64,67
Гостиницы и рестораны	0,27	-4,44	9,16	9,45	42,81	-83,42	-46,79
Транспорт и связь	-	121,52	-158,17	-83,99	300,35	-334,66	-96,70
Транспорт	-	148,11	-171,19	-91,66	351,36	-345,05	-100,50
Связь	0,57	-59,90	248,77	373,86	-37,77	134,93	110,34
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	-0,58	27,78	-62,64	-33,30	131,64	-253,30	-73,27

Рассмотрим, например, отрасль «Текстильное и швейное производство». В 2009 г у предприятий данного вида деятельности коэффициент мотивации был равен . Для того, чтобы данной отрасли выйти на уровень мотивации с коэффициентом необходимо либо увеличить выпуск продукции на 19,72 %, либо уменьшить материальные затраты на 36,38 % (что может привести к снижению качества продукции), либо повысить производительность труда, соответственно уменьшению фонда заработной платы на 30,11 % (что приведет к снижению мотивации ра-ботников предприятий). Для достижения более высокой мотивации, необходимо еще большее изменение перечисленных показателей производственной деятельности.

Рассмотрим отрасль с положительной мотивацией. Например, «Гостиницы и рестораны» ( ). На основании данных табл. 1 можно заключить, что при снижении выпуска (цены на единицу) продукции на 4,44 % или увеличении материальных затрат на производство продукции на 9,16 %, или увеличения расходов на оплату труда на 9,45 % мотивация упадет до уровня .

А увеличив выпуск продукции на 42,81 % или уменьшив материальные затраты на 83,42 % можно достичь уровня мотивации равного 0,5.

Современный период реформирования налоговой системы выдвигает задачи совершенствования моделей обработки данных, позволяющих повысить качество принятия управленческих решений. Результаты проведенного анализа могут быть положены в основу разработки плана оздоровления и развития отраслей региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ованесян С.С. Математическое моделиро-вание в бухгалтерском учете, анализе и налогообложении. – Иркутск : Изд-во БГУЭП, 2001. – 120 с.
2. Черхарова Н.И. Системный анализ мотивации предприятий-налогоплательщиков региона (на примере Забайкальского края) / Н.И. Черхарова, С.С. Ованесян // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права) – электронный журнал. – 2011. – №4.
3. Отчет «О поступлении налоговых платежей в бюджетную систему РФ по основным видам экономической деятельности по Забайкальскому краю» (форма №1-НОМ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.r75.nalog/ru/docu-ment.php?id=232044&topic=1nom75.
4. Отчет «Основные показатели деятельности организаций за 2009г.» (код по каталогу 1.80) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://chita.gks.ru/BGD/Bas_10ex/IssWWW.exe/Stg/mes7/1_80~1.htm.

УДК 621.039

Комлева Елена Владимировна,
научный сотрудник Института философии и политологии,
Дортмундского технического университета, Германия,
e-mail: elena.komleva@uni-dortmund.de, komleva_ap@mail.ru

ФЕНОМЕН ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ: ДУХОВНО-ГУМАНИТАРНО-ПРАГМАТИЧНЫЙ ВЗГЛЯД

E.V. Komleva

THE PHENOMENON OF NUCLEAR ENERGY: SPIRITUAL-HUMANITARIAN-PRAGMATIC VIEW

Аннотация. *Выполнены пионерные для России комплексные исследования антропосоциальной компоненты феномена ядерной энергии – феномена, без которого жизнь на Земле исключена. Исследования доведены до прагматичного образа SAMPO.*

Ключевые слова: *ядерная энергия, человек, социум, материальная и духовная культура.*

Abstract. *Complex pioneer for Russia research on the anthropo-social component of the phenomenon of nuclear energy,vitally important for life on the Earth, is carried out. The research is led to the pragmatic image of SAMPO.*

Keywords: *nuclear energy, man, socium, material and spiritual culture.*

Вот мое предназначенье – сесть спокойно у воды
и свести в одно сеченье жизнь песчинки и звезды.
Привести к одной системе сердце солнца и свое.
И услышать, как в весенней роще иволга поет.
И увидеть, как бездонно небо, - не вмещает грудь!
Посолить краюшку хлеба, съесть ее и …
Снова в путь.

Т. Полежаева.
«Эхо полевых сезонов». Стихи. Архангельск

В ходе более чем десятилетних исследований на базе десяти российских и зарубежных университетов и институтов сформирована научно-прагматическая позиция, почувствованы задачи и получены некоторые результаты.

Феномен ядерной энергии в прошлом, настоящем и будущем был, есть и будет чрезвычайно важным для людей. Ядерная энергия крепкими узами связана с человечеством. И человечество ощутило себя единым и хрупким сущим впервые перед ядерной опасностью. Техногенные ядерное благо или ядерная опасность для человечества – большей частью все же от человека и социума. И то, и другое – «плоть от плоти» разума, души и рук человеческих. Это формирует обратную связь – влияние человека, такого как есть и каким будет в антропосоциальном смысле, на возможные последствия ядерных явлений. Суперглобальному значению, негативным вызовам и позитивным возможностям ядерной энергии должны соответствовать адекватные по усилиям, комплексности и полноте, активности и постоянству подходы и действия при осмыслении, сдерживании или адаптации к реальным условиям человечества этих свойств феномена. А также серьезные вопросы о готовности людей к принятому разумом и сердцем сосуществованию с ядерной энергией сейчас и в будущем.

Ядерный феномен по праву стал предметом внимательнейшего изучения философии, политологии, экономики и экологии. Попал в поле зрения других наук, религии, духовного творчества и общечеловеческой культуры. И это пристальное внимание имеет перспективу существовать века. Двух немецких философов в контексте генеральной методологии можно считать ключевыми фигурами при обращении к теме. Это К. Ясперс и Э. Кассирер. Первый задал мотивацию и путь к поиску антропосоциоядерных ракурсов, а также определению масштаба научной проблемы. Второй «подсказывает» социокультурный характер и инструментарий познания на этом пути.

Существует тенденция, в контексте духовно-гуманитарного понимания глобальных проблем, к восприятию феномена амбивалентной ядерной энергии во всей доступной на сегодня его полноте. Целесообразно усиление интегральной в содержательных смыслах общего познавательного опыта, поли- и междисциплинарной относительно наук о человеке и обществе и вненаучных знаний о человеке, системной и деятельностно-ориентированной совместной рефлексии человеческой цивилизации и ядерной энергии. Рефлексии в двуедином контексте как их сосуществования и взаимодействия в виде относительно внешних друг для друга объектов, так и того обстоятельства, что ядерное есть неотъемлемая часть феномена человечества.

Можно обозначить основные связи ядерной энергии с другими важными в судьбе человечества явлениями – бытийные контуры антропосоциальной компоненты ядерного феномена.

На основе «логических цепочек», в контексте известной общечеловеческой идеи всеединства и единения в многообразии, различные грани которой интерпретированы многими философами, естествоиспытателями, писателями и политиками, предложен образ-схема связного множества антропосоциоядерных комбинаций, современных «окрестностей» ядерной энергии. Пространства ассоциативных связей, явных, случайных и смысловых совпадений или как бы совпадений, взаимоотношений, соотнесений, сопряжений ее и других глобальных явлений. Как правило, в социальных аспектах взаимодействие в каждой «цепочке» – двояконаправленное. Образ «континуума» проявлений ядерной энергии и антропосоциальных, совокупного феномена «окрестностей» и ядерной энергии, способствует обобщению и объединению узкоспециализированных «ведомственных» подходов к рефлексии, переходу количества в качество, скачку мысли к пониманию необходимости широкого и глубокого антропосоциоядерного «смотрения» и комплексно интегрированных действий.

Некоторые примеры логических «цепочек», характеризующих прямые или опосредованные связи, зависимости, взаимодействия, соотнесения, сопряжения между ядерной энергией (ЯЭ) и другими важными для человека и человечества явлениями:

ЯЭ – материя, энергия, пространство, время – вселенная – мировоззрение в целом;

ЯЭ – Солнце – естественные процессы в гео- и биосферах – жизнь на Земле;

ЯЭ – эсхатологический потенциал - концепция Бога и человека;

ЯЭ – эсхатологический потенциал – реальное «качество» человека и общества;

ЯЭ – энергетическая стратегия – глобальная социальная стратегия;

ЯЭ – ядерное оружие – человечество как хрупкий единый организм;

ЯЭ – ядерное оружие – тоталитаризм;

ЯЭ – научные доминанты и тайны XX и XXI веков – биология;

ЯЭ – общество риска – теория общества;

ЯЭ – ядерная физика и радиохимия – естественные науки;

ЯЭ – уран, торий – геология и горное дело;

ЯЭ – совместное исследование (ЦЕРН, Дубна) – интеграция человечества;

ЯЭ – Солнце и звезды – стратегические энергетические задачи;

ЯЭ – наука и техника – прогресс и общепланетарный кризис;

ЯЭ – демография – экономические, политические и военные кризисы;

ЯЭ – смена энергоносителей – экономические, политические и военные кризисы;

ЯЭ – энергетика – структура и уровень сельского хозяйства и промышленности;

ЯЭ – ядерное оружие – оружие массового поражения в целом и терроризм;

ЯЭ – ядерное оружие – так называемое «геофизическое» оружие;

ЯЭ – история мировых войн – модель стабильного сосуществования;

ЯЭ – ядерная дискриминация – социально-экономическое неравенство;

ЯЭ – Иран – право нации на владение ЯЭ;

ЯЭ – Северная Корея – стратегическое жизнеобеспечение как эквивалент ЯЭ;

ЯЭ – ООН, МАГАТЭ – институты глобального управления;

ЯЭ – управление устойчивым развитием – гражданское общество;

ЯЭ – глобальные возможности и риски – этика и философия техники;

ЯЭ – изменение климата – энергетическая философия и политика;

ЯЭ – Чернобыль – глобальный экологический кризис;

ЯЭ – радиоактивные отходы – отходы жизнедеятельности в целом;

ЯЭ – амбивалентность – информационные, био- и другие технологии – человек;

ЯЭ – маргинальные полигоны – аборигены, биоразнообразие;

ЯЭ – длительные выгоды и опасности – футурология;

ЯЭ – управление ядерной сферой – структура и качество информации;

ЯЭ – энергия, экология, социальная сфера, устойчивость – Agenda 21;

ЯЭ – ядерные сообщества (NEA, FNCA) – международные экономические союзы;

ЯЭ – ядерная деятельность – нефть и газ – экономические и политические приоритеты;

ЯЭ – гелиевая энергетика – исследование Луны;

ЯЭ – базовая мотивация познания и применения – философия и аксиология;

ЯЭ – неоднозначность микромира – методология естественных и социальных наук;

ЯЭ – терминология – категориальный аппарат философии;

ЯЭ – апологеты и оппоненты – образование и просвещение;

ЯЭ – ядерная ментальность – общественное сознание в целом;

ЯЭ – ядерная этика – культурные и религиозные традиции;

ЯЭ – морально-нравственные нормы и секретность – открытость ядерной информации;

ЯЭ – ядерные образы – художественное творчество;

ЯЭ – нечувственное восприятие «квантов» реальности – мистическое мировоззрение;

ЯЭ – социальная мистика ядерных и других явлений – иррациональная рефлексия;

ЯЭ – энергетический фактор – история технологического развития человечества;

ЯЭ – история ядерной науки и техносферы – памятники истории и культуры;

ЯЭ – ядерная история – история духовно-гуманитарной рефлексии ядерного социума.

Данный список таких «цепочек» крупных мировоззренческих и приоритетных интеллектуально-прагматических проблем, тем, задач, действий и тому подобных граней социума, конечно же, лишь как частная выборка ограниченно отражает фактическое антропосоциоядерное пространство и открыт для продолжения. Здесь это, прежде всего, иллюстрация идеи о необходимости комплексного подхода к изучению феномена ядерной энергии, в увязке с широким спектром научных тем, практических задач и рефлексивных, с помощью разнообразных символов и образов, возможностей человечества.

Намечены подходы к усилению Human Dimension, гуманистических и гуманитарных начал и мотиваций в антропосоциальной компоненте феномена ядерной энергии, позиций своеобразного антропного социоядерного или антропосоциоядерного принципа. Плодотворно обращение к аналогу широко известного классического *антропного принципа*, значимого и непротиворечивого одновременно для важнейших социокультурных парадигм – естественнонаучной, философской и религиозной. Социоядерный антропный принцип усиливает перспективы синтеза единой светско-религиозной социоментальной (дополнительно к технологической) и совокупной прагматической платформы относительно ядерного феномена.

Полезно, несомненно, оконтурить также понятийное пространство применительно к антропным и социальным аспектам ядерной энергии, предложить рабочие версии главных понятий.

ФЕНОМЕН ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ. Облик феномена ядерной энергии многообразен. Материально и принципиально он формируется как природными (известными и неизвестными человеку), так и антропогенными сущностями. В простом перечислении «первого приближения» – это звезды, космические излучения, часть тепла недр и естественная радиоактивность Земли, природные ядерные реакторы. А также – ядерное оружие, ядерное сдерживание и нераспространение, гражданская ядерная энергетика, атомные военные и гражданские, подводные и надводные суда, наземные и подземные ядерные объекты различного назначения. Кроме того – это источники энергии длительного пользования для освоения космоса, научные приборы и средства технологического контроля и воздействия в медицине, сельском хозяйстве и промышленности, радиоактивные отходы со сроком хранения в сотни тысяч лет. Известные (и неизвестные как отдельная часть) природные и антропогенные ядерные сущности представляют, хотя и в разной степени, сферу интеллектуальных и практических интересов и действий людей, связаны «эфиром» людского внимания.

АНТРОПОСОЦИАЛЬНАЯ КОМПОНЕНТА ФЕНОМЕНА ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ. Это все положительные и негативные, естественного и искусственного происхождения проявления и эффекты ядерной энергии в жизни людей, которыми ядерная энергия посредством различных систем символов, так или иначе, уже идентифицируется социумом в своем ментальном пространстве. Все наши задачи и проблемы, надежды и заботы, удачные или неудачные мысли и практические действия, с которыми она напрямую или косвенно связана. Все явления человечества, которые зависят от ядерной энергии. Все явления человечества, от которых зависит «бытие» ядерной энергии в контакте с человечеством. Все явления человечества, которые развиваются во взаимосвязи с феноменом ядерной энергии. Связи, зависимости и взаимодействия, в космологическом смысле бывшие большей частью, по крайней мере – по отношению к периоду существования живой материи, практически всегда, но особенно отныне, с возникновением ядерной техносферы, – вечные и важные составные части среды существования людей. И наша естественнонаучная и техническая, философская и религиозная, духовно-гуманитарная на основе других и разных видов социального знания рефлексия их, а также наше изменение их. Другими словами, антропосоциальная компонента ядерного феномена – это, соответственно материально-духовной дихотомии человека, комплексное материально-духовное бытие человека в условиях ядерной вселенной и ядерного социума.

СОЦИОЯДЕРНЫЙ АНТРОПНЫЙ ПРИНЦИП – это требование таких рефлексии и действий, чтобы в будущем антропосоциальная компонента феномена ядерной энергии формировалась в совокупном светско-религиозном «поле» лучшего духовно-гуманитарного и рукотворного наследия человечества, была адекватной ему и позитивно участвовала в генерировании новых пластов материальной и духовной культуры, чтобы «ядерный человек» был гуманным и позитивно «культурогенным». Другими словами, это требование оптимизации «параметров антропосоциоядерной вселенной» с позиций блага человека, посредст-

вом гуманизации и гуманитаризации интеллектуальной и практической деятельности в ядерной сфере.

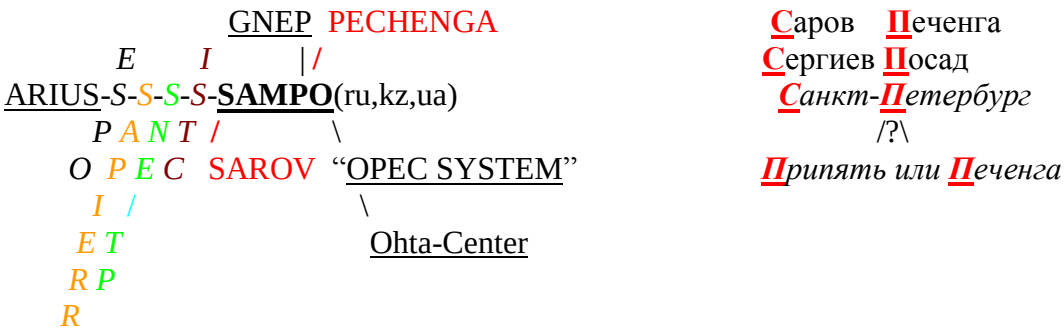
Мною в разных публикациях подробно показаны примеры некоторых фрагментов рассматриваемой компоненты, их светские и религиозные, философские, экономические и историко-политологические аспекты. А также информационные, коммуникационные, ментальные и экологические модусы современного ядерного социума. И методологические пути, инструментарий их совместного осмысления, известные из истории и оконтуренные для будущего. В ракурсе антропосоциоядерных вызовов и надежд, негатива и позитива обозначен рефлексивный потенциал мировоззренческих систем (философия, религия), наук о человеке и обществе, духовного творчества (искусство, литература, миф) и морально-нравственных традиций. В частности, при осмыслении международными усилиями в рамках гипотезы SAMPO: в контексте смыслов региональных Scandinavian (or Slavic, Saida, Severodvinsk, Spitsbergen, Saamen, Solikamsk, Siberian, Streltsovsky, Selenge, Salekhard, Sakha, Sakhalin, Simushir, Semipalatinsk, Sarov, Seversk, Slavutich, Sosny) Atomic Mission – the Proliferation's Oikumene и общечеловеческого Special Anthropic Mission – the Power (Prometheus) Obedience. Обозначен также потенциал в процессе информационно-аналитической социально-ядерной деятельности.

Методология SAMPO соответствует инициативе Президента Российской Федерации (2006 г.) по Глобальной ядерной инфраструктуре. И разрабатываемой РАН и Росатомом (А.А. Саркисов) для Севера России идеологии интеграционного подхода к проблемам ядерных отходов. Гипотезу SAMPO начинают серьезно обсуждать. Одна из моих статей отражена в официальном библиографическом списке материалов к рассмотрению законопроекта республики Беларусь «Об использовании атомной энергии». Другая опубликована в материалах ярмарки инновационных проектов АТОМЭКО-2008.

Думаю, продолжение обсуждений последует, так как, например, специалисты Кольского научного центра РАН предложили построить «вечное» подземное ядерное хранилище в горле Кольского залива (Сайда Губа – «подбрюшье» Североморска и Мурманска). Второй вариант такого объекта (Дальние Зеленцы) предлагается учеными «под боком» у будущей инфраструктуры Газпрома и полигона, где погиб «Курск». Ситуацию «подогревает» недавнее решение Б. Обамы, вопреки действующему «Акту о политике в отношении ядерных отходов», через 22 года с начала строительства и после затрат в 9 миллиардов долларов, прекратить реализацию проекта «путеводной звезды», прототипа для многих подобного рода строек – национального хранилища Yucca Mountain. А также – появившиеся раньше идея и проекты интернационализации последней стадии обращения с ядерными отходами, их надежной изоляции от биосферы. Возникают конкретные вопросы «как?» и «где?» Особенно после вступления в силу (конец 2010 г.) американо-российского Соглашения № 123, открывающего странам возможность обмена ядерными материалами.

Россия давно и активно стремится соответствовать новым возможностям в рамках концепции международных и долговременных хранилищ подземного типа на своей территории. Наиболее «продвинутыми» вариантами являются площадки вблизи Красноярска и границы с Китаем и Монголией (Краснокаменск).

Необходимо в связи с SAMPO отметить доминирование принципа нераспространения ядерных материалов, преемственность и взаимосвязь не только российских ядерно-религиозных центров, но и международных энергетических проектов. На схеме: слева – взаимосвязи базового концепта SAMPO, справа – исключительно религиозный контекст и с дополнением футурологических мотивов относительно перспектив ядерно-религиозно-мистического Санкт-Петербурга.



Одним из авторов работ, способствовавших отмене на довольно высоких стадиях реализации некачественных с научной точки зрения проектов подземных ядерных хранилищ Yucca Mountain и Новой Земли, является новосибирский геолог с украинскими «корнями» Ю.В. Дублянский (Juri Dublyansky), много работающий за рубежами бывшего СССР. Уникальная ситуация: его общая эрудиция и знания в сфере инженерной геологии и гидрогеологии, низкотемпературных гидротермальных процессов дважды значимо повлияли на формирование решений ведущих ядерных стран относительно места размещения природно-техногенных объектов, безопасно функционировать которые по нормативам должны не менее десяти тысяч лет. А косвенно возможно ожидать отложенное влияние этих факторов и событий на общечеловеческое будущее ядерной проблематики. Он, кроме того, нелицеприятно сопоставил стиль собственных геологических обоснований таких объектов российскими и американскими ядерными ведомствами и финансирования ими независимых оценок.

Нет пока, к сожалению, подобных Ю.В. Дублянскому по объективности, профессионализму и опыту работы с иностранными партнерами людей, которые проявили бы интерес к организации и выполнению на международной основе анализа жизнеспособности замещающей вакуум после закрытия упомянутых проектов гипотезы SAMPO (ru,kz,ua).

Следует сказать, что в породах Печенги, где возможна материализация одного из вариантов SAMPO, российскими и норвежскими геологами найдены окаменелые образцы древнейших, возрастом более 2 миллиардов лет, микроорганизмов (*Pechengia melezhiki*), сформировавших на Земле важнейшие условия для будущей биологической эволюции (развития на кислородной основе) вплоть до высших форм. Эти сохранившиеся до нас окаменелости возможно, видимо, считать признаком региональной геологической долговременной стабильности, столь необходимой ядерным объектам. Своеобразным талисманом-оберегом. А сочетание открытия *Pechengia melezhiki* с SAMPO–символом трансформации и преемственности энергетики жизни.

Применительно к антропосоциоядерной сфере изучено состояние дел в политических и научных институтах ООН. Выполнен анализ методологии исследований The United Nations University и The Hiroshima Peace Institute. Целесообразно рассматривать далее социальные и антропные аспекты ядерной энергии по сетевому принципу – в UNU (лидер-координатор) и других университетах единой «сети сетей». На духовно-гуманитарной, рационально-иррациональной методологической базе, отвечающей максимально полной реализации концепта и ракурсов суммарного знания о человеке и обществе, с позиций принципов гражданского общества. Для содействия выработке адекватных задачам развития человечества научных (гуманитарных и естественно-научных), технических и политических рекомендаций в связи с необходимостью мониторинга ядерной и сопряженных с ней сфер цивилизации и ядерного общественного сознания, влияния на их эволюцию с целью сделать ядерный мир безопасным, долговечным и комфортным. Для успешного интеллектуального поиска и практического укоренения генерирующих оптимальное будущее антропосоциоядерных начал.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комлева Е. В. Человечество и ядерная энергия: попытка социокультурного соосмысления. // Информационно-коммуникационные технологии в системе культурно-цивилизационных преобразований : материалы всерос. науч. конф. (Челябинск, 21 окт. 2010 г.) / Челяб. гос. акад. культуры и искусств ; сост. Т. Ф. Берестова, Ю. В. Гушул. – Челябинск, 2010. – С. 50–54.
2. Комлева Е. В. Ядерное человечество и Ф.М. Достоевский [Электронный ресурс] – URL : http://rulit.org/read/860. (дата обращения 29.10.2010).
3. Комлева Е. Антропосоциоядерный дискурс и духовное наследие Ф. М. Достоевского // Мәдениет жаршысы. – 2010. – № 5. – С. 27–31.
4. Комлева Е. В. Антропоцентричность ядерной энергии, тезисы доклада // Язык, культура, общество : материалы конф. – М., 2009.
5. Комлева Е. В. Ядерные проблемы социального сосуществования // Север промышленный. – 2009. – Октябрь. – С. 40–43.
6. Комлева Е. В. Социоядерные начала или начала социоядерного бытия [Электронный ресурс]. – URL : //www.dialog21.ru/biblio/komleva.htm). (дата обращения 27.07.2011).
7. Комлева Е. В. Социоядерный антропный принцип и геоядерная прагматика // Минеральное сырье Урала. – 2008. – № 5. – С. 44–47 ; Эколог. вестн. России. – 2009, № 1. – С. 39–42.
8. Комлева Е. В. Феномен ядерной энергии и пространство символических форм // Философия науки. – 2008. – № 3. – С. 77–114.
9. Комлева Е. В. Развитие ядерно-нефтегазовой ситуации Севера Европы // Экологический вестник России. – 2008. – № 8. – С. 41–47 ; № 9.

– С. 36–40.
10. Комлева Е. В. Рефлексия ядерно-нефтегазовой ситуации Севера Европы: интересы и потенциал Германии как партнера России // Геофиз. журн.. – Киев. – 2008. – № 2, т. 30. – С. 3–31. Диплом за 1 место в Международном конкурсе по полярным исследованиям, посвященным Международному полярному году 2007/2008 гг., декабрь 2007 г., Санкт-Петербург.
11. Комлева Е. В. Ядерный Мурманск // Национальные интересы. – 2007. – № 4 (51). – С. 55–59.
12. Комлева Е. В. Цивилизация и ядерная энергия: их соосмысление в ООН для мира и управления устойчивым развитием // Философия науки. – 2007. – № 2 (33). – С. 3–45.
13. Комлева Е. В. Ядерные отходы, газовые месторождения и безопасность Севера Европы // ЭКО: Всерос. экон. журн. – 2007. – № 3. – С. 104–111.
14. Комлева Е. В. Духовно-гуманитарное окормление ядерно-нефтегазовой России // Энергетическая политика Украины. – 2006. – № 1.
15. Комлева Е. В. Ядерная энергия: о мере человечности // Вестн. аналитики. – 2005. – № 2. – С. 68–85.
16. Комлева Е. В. Ядерная энергия: социальные аспекты // Ядерно-энергетические системы для будущих поколений и глобальной стабильности GLOBAL 2005: тезисы докл. Междунар. конф. (Цукуба 9-14 октября 2005 г.). – Япония, 2005.
17. Комлева Е. В. Социально-философские проблемы развития ядерной техносферы в России // Философия науки. – 2004. – № 3 (22). – С. 121–134.
18. Комлева Е. В. Информационная поддержка решений в радиоэкологии // Вопросы радиационной безопасности. – 2001. – № 4. – С. 52–55.

Благодарю за поддержку отдельных этапов исследований EU Program «Gateway Education», Research Council of Norway, Canon Foundation in Europe, Deutscher Akademischer Austauschdienst и World Nuclear University, профессоров B. Falkenburg, N. Witoszek, D. Macer, R. Thakur, A.H. Zakri, P. Masterson, M. Taeb, T. Kawabe, P. Lakkala, L. Kurppa, V. Ryabev, V. Masloboev, T. Meyer, Z. Fadeeva и многих-многих других, а также научных сотрудников Института философии и политологии Дортмундского технического университета.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Иркутский государственный университет путей сообщения
Иркутский научный центр СО РАН
Российская инженерная академия

Современные технологии

Системный анализ

Моделирование

№3(31)

2011

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Ответственный за выпуск **В.Е. Гозбенко**

Подписано в печать 01.09.2011. Формат 60x84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 30.
Уч.-изд. л. 33,6. Тираж 500 экз. Заказ № ____
Подписной индекс по каталогу «Почта России»: 64556
ISSN: 1813-9108
Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ.
Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory»

ИД №06506 от 26.12.01
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по
делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ №13-0574 от 24 декабря 2003 г.
Учредитель Иркутский государственный университет путей сообщения
(664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15)

© Иркутский государственный университет путей сообщения