



33. Specht D.F. Probabilistic neural networks // Neural Networks. 1990. Vol. 3. P. 109–118.
34. Christmann A, Steinwart I. Support vector machines. 2008. 466 p.
35. Platt C.J. Probabilistic Outputs for Support Vector Machines and Comparisons to Regularized Likelihood Methods [Electronic resource]. 1999. URL: [citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.41.1639&rep=rep1&type=pdf](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.41.1639&rep=rep1&type=pdf) (access date: 20.03.2017).
36. Campbell C., Cristianini N. Simple Learning Algorithms for Training Support Vector Machines [Electronic resource]. 1999. URL: <http://www.svms.org/training/CaCr.pdf> (access date: 12.12.2016).
37. Vaxjo K. Evaluation of logistic regression and random forest classification based on prediction accuracy and metadata analysis [Electronic resource]. 2014. URL: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:724982/FULLTEXT01.pdf> (access date: 11.10.2016).
38. Crawford M.M., Ham J., Chen Y., Ghosh J. Random forests of binary hierarchical classification for analysis of hierarchical data [Electronic resource]. 2014. <http://www.csr.utexas.edu/hyperspectral/papers/crawford03.pdf> (access date: 12.03.2017).

УДК 622.23.05+67.05

**Сысоев Иван Алексеевич,***к. т. н., ведущий научный сотрудник ИТЦ,**Иркутский национальный исследовательский технический университет,**тел. 8(902)511-85-87, e-mail: lwansys@mail.ru***Зими́на Татьяна Игоревна,***инженер НИЧ, Иркутский национальный исследовательский технический университет,**тел. 8(950)120-03-13, e-mail: zyoma92@gmail.com***Колмогорцев Илья Владимирович,***программист УНЦ «Autodesk», Иркутский национальный исследовательский технический университет,**тел. 8(904)158-77-98, e-mail: ivk@istu.edu*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕННИКА В ПАКЕТЕ ПРИКЛАДНОЙ ПРОГРАММЫ ANSYS

*I. A. Sysoev, T. I. Zimina, I. V. Kolmogortsev*

### MODELING OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION ON THE SURFACE OF THE HEAT EXCHANGER IN THE PACKAGE OF APPLIED PROGRAM ANSYS

**Аннотация.** В данной работе приведено моделирование распределения температур на поверхности теплообменника в пакете прикладной программы ANSYS. В части НИОКР, посвященной разработке устройства по преобразованию тепла в электрическую энергию, созданы модели экспериментального теплообменного аппарата, включающие численные модели для расчета трехмерных распределений скорости газового потока, температурных полей, интенсивности турбулентности потока и статического давления. Проведена первичная оценка параметров теплообменника и установлены прогнозируемые показатели при расходе и температуре газов на входе, соответствующих данным технического задания. Совокупный анализ результатов моделирования позволяет определить зоны для наиболее эффективной установки преобразователей тепла в электроэнергию: элементы ТЭП на боковых поверхностях конуса. В работе разработан и изготовлен опытный образец ТЭП, проведены исследования термоэлектрического преобразования. В работе также проведена первоначальная оценка состояния после запуска прототипов высокоамперных электролизеров опытного участка РА-550, а именно измерение материального баланса выбросов через фонарь корпуса (выход) и приточную вентиляцию (вход). Все задачи этапа решены в полном объеме, поставленные цели достигнуты, результаты запланированных работ получены.

**Ключевые слова:** моделирование, теплообменник, электролизер, ANSYS.

**Abstract.** This paper describes modelling of the temperature distribution on the surface of the heat exchanger in the package of applied programs ANSYS. In the part of RTD projects devoted to the development of a device for converting heat into electrical energy the model of experimental heat exchanger is established, comprising a numerical model to calculate three-dimensional distributions of the gas flow rate, temperature fields, intensity of turbulence and static pressure. The initial evaluation of performance of the heat exchanger is carried out and the following projections at the flow and temperature of gases at the inlet corresponding to the TK data are made. The combined analysis of the simulation results allows to determine the zone for the most efficient installation of converters of heat into electricity: the elements of TEP on the side surfaces of the cone. In this paper we developed and manufactured a prototype of TEP, the study of thermoelectric conversion was conducted. The paper also carried out the initial assessment after the launch of the prototype of the high current electrolyzers experimental plot of RA-550, namely the measurement of material balance of emission through the housing light (outlet) and forced ventilation (inlet). All stages tasks, solved in full, goals achieved, results of planned activities are obtained.

**Keywords:** modeling, heat exchanger, electrolyzer, ANSYS.

#### Введение

В настоящее время ужесточаются требова-

ния к энерго- и ресурсосбережению в связи с возникшей проблемой нарастающего дефицита элек-

троэнергии. Это обусловлено тем, что темпы развития крупных городов превышают ранее заложенные: развиваются социальная сфера, жилищное строительство и промышленное производство. При этом алюминиевые заводы являются одними из крупнейших энергопотребителей с малоизменяемым графиком нагрузки и высокой степенью зависимости от источника электроэнергии и ее стоимости. Технология электролиза алюминия непрерывно совершенствуется в сторону увеличения единичной мощности электролизеров. Ведущие алюминиевые компании мира стремятся к эксплуатации мощных электролизеров, работающих на высокой силе тока (300–500 кА), так как их применение позволяет повысить экономическую эффективность новых заводов за счет снижения удельных капитальных и операционных затрат.

Проведено достаточно большое число исследований в направлении энергоэффективности и энергосбережения производства алюминия [1–32]. Одним из перспективных направлений представляется разработка и внедрение эффективных теплообменных аппаратов [33–35].

#### **Постановка задачи. Исходные данные для моделирования работы теплообменника**

Сечение рабочей части ЭТА – квадрат со сторонами  $2 \times 2$  м, длина рабочей части 6 м, теплообменные элементы располагаются только в пределах рабочей части. На вход подаётся сухой воздух с температурой  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , расход  $76\ 000\ \text{м}^3/\text{ч}$ .

Охлаждение выполняется водой с температурой на входе в теплообменник  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

На выходе требуется получить температуру воздуха не более  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и падение давления не более  $100\ \text{Па}$ .

Эти условия соответствуют достижению расчётными моделями полностью стационарного состояния по полям скоростей и расходов моделируемых жидкостей, приносимому и уносимому из моделируемого пространства теплу, а также стабилизации вязкостных и турбулентных показателей.

#### **Описание динамической модели газового потока**

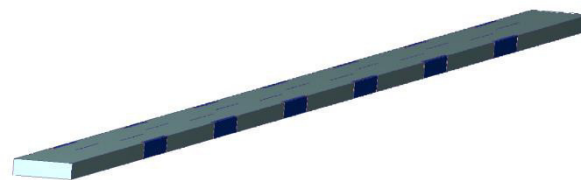
Виртуальное моделирование ЭТА, а именно потоков охлаждаемого газа и теплообмена газ – материал теплообменных элементов (ТЭ) – охлаждающая жидкость, выполнено с помощью программного комплекса ANSYS на основе метода контрольных объёмов.

Подготовка сетки контрольных объёмов для каждой расчётной модели ЭТА выполнена исходя из геометрических и размерных особенностей моделей для обеспечения достаточного уровня численной сходимости задач [1–12].

Решение каждой из задач выполнено в статической постановке итерационно до достижения расчётными моделями полностью равновесного и устойчивого состояния по полям скоростей и расходов моделируемых жидкостей, приносимому и уносимому из моделируемого пространства теплу, а также стабилизации вязкостных и турбулентных показателей:

- по массовым расходам газа и жидкости на граничных условиях;
- по расходу и приходу тепла в модель на граничных условиях;
- по энергии вязкого сопротивления и турбулентного сопротивления по объёму модели.

Расчётная модель теплообменника представляет собой продольную вырезку из полной геометрической модели в виде продольного канала, соответствующего по размерам и положению периодическому участку всей конструкции (рис. 1).



**Рис. 1. Геометрическая модель продольной вырезки теплообменника**

В модели заложены следующие внешние (граничные) условия:

- условие заданного массового расхода через входную поверхность, рассчитанное из соотношения полного расхода через моделируемый теплообменник к площади проходного сечения теплообменника;
- условия периодической симметрии на всех границах сопряжения (симметрии);
- условие открытости (отсутствия подпора давлением) на выходной поверхности;
- условие заданной температуры поступающего в модель газа на входной поверхности;
- условие заданной температуры охлаждающей жидкости.

Аналогично ранее подготовленным моделям оценивались величины:

- статического давления на входной поверхности (потребного давления для обеспечения заданного массового расхода через модель);
- усреднённой температуры газа на выходной поверхности.

Дополнительно были получены распределения температур потока по объёму модели (Рис. 2) и распределения скоростей потока по объёму модели (рис. 3).

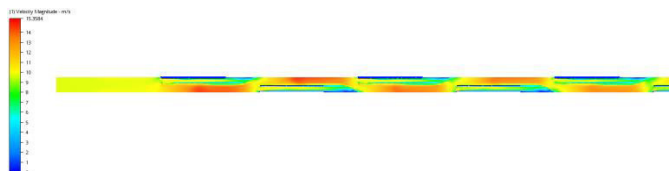


Рис. 2. Распределение скоростей потока (показана часть модели)

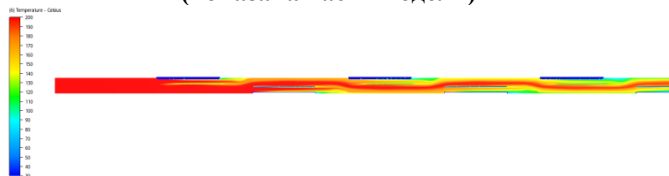


Рис. 3. Распределение температуры потока (показана часть модели)

В результате обработки были получены следующие значения:

- гидравлическое сопротивление 20,2 Па;
- температура газов на выходном сечении 98 °С.

Температура, полученная на выходном сечении, удовлетворяет требованиям ТЗ на проектируемый теплообменник.

Приведённое здесь сопротивление (20,2 Па) – сопротивление собственно теплообменной части, сопротивление самого корпуса теплообменника составляет порядка 80–120 Па в зависимости от особенностей конструкции и исполнения его

отдельных конструктивных элементов.

Таким образом, от конструкции теплообменника, соответствующей данной модели, можно ожидать следующих показателей при расходе и температуре газов на входе, соответствующих данным ТЗ:

- 1) снижение температуры газа до 98 °С;
- 2) полное сопротивление порядка 100–140 Па.

#### Модель распределения температур на поверхности теплообменника

Задача моделирования состояла в том, чтобы определить распределение температур на внешней поверхности конуса, предоставить зонированную информацию по температурам для последующего выбора участков монтажа ТЭП.

В качестве исходных данных предоставлены:

1) конкурсная документация на корпус ЭТА (рис. 4).

2) результаты ранее проведённых расчётов и исследований (подробнее см. предыдущие этапы проектирования и моделирования ЛТА и ЭТА):

- массовый расход охлаждаемых газов через ЭТА 27,314 кг/с;
- максимальная температура охлаждаемых газов на входе в ЭТА 200 °С.

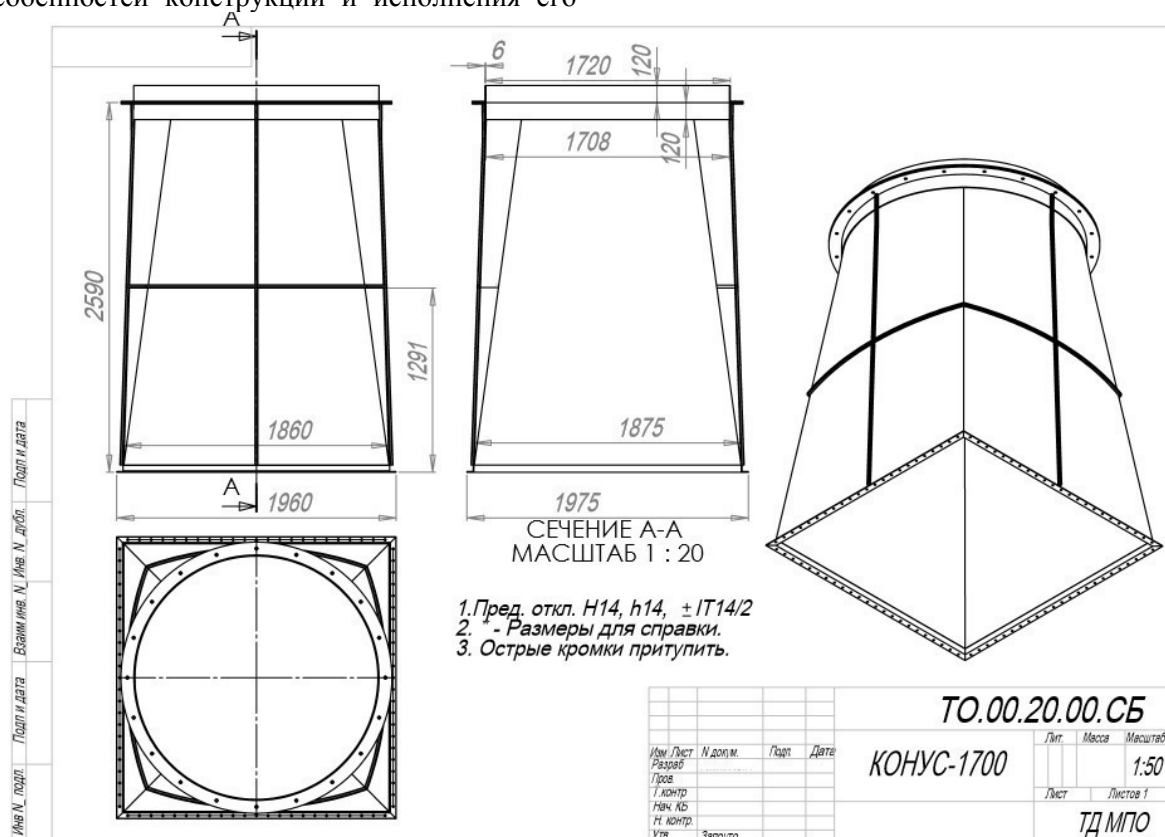
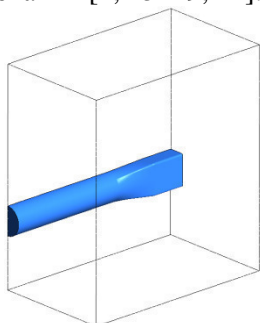


Рис. 4. Сборочный чертеж конуса ЭТА

Расчётная модель содержит два гидравлических домена: для уличного воздуха и для охлаждаемого газа (рис. 5). Теплопередача между доменами рассчитана из условия известной теплопроводности материала и толщины стенок конуса, теплообмен в пограничных слоях газовых сред с двух сторон стенок конуса рассчитывается средствами системы моделирования [2, 15–19, 24].



**Рис. 5** Общий вид расчётной модели: домен охлаждаемых газов, домен наружного воздуха – контуром

Рельеф мелких конструктивных элементов (стыковочных фланцев, элементов жёсткости и других) не учитывался в силу малого влияния. В качестве исходной геометрии использована существующая геометрическая модель, на основании которой выполнена предоставленная в исходных данных документация.

С помощью инструментов геометрического моделирования ANSYS DesignModeller выполнены дополнительные построения:

- рассечение модели по плоскости симметрии;
- отброшены несущественные элементы геометрии в соответствии с принятыми допущениями;

- построен объём (геометрическое тело) домена окружающего воздуха;

- построены часть трубопровода до переходного конуса (зоны установки ТЭП) и часть корпуса ЭТА за ним. Для последующего построения модели приняты следующие граничные условия:

- расход через входную границу домена охлаждаемого газа – в соответствии с исходными данными;

- условия симметрии на границах сечения модели (использована одна плоскость симметрии);

- условия свободных границ для верхней и нижней плоскостей домена наружного воздуха;

- условие нулевого избыточного давления на выходной границе домена охлаждаемого газа;

- температура охлаждаемого газа на входной границе – в соответствии с исходными данными;

- температура поступающего газа на открытых границах домена наружного воздуха 20 °С;

- атмосферное давление соответствует нормальным условиям (101,3 кПа).

- теплопередача между поверхностями соприкосновения доменов задана с учётом толщины и материала, разделяющего их, – толщины оболочки корпуса ЭТА и материала (сталь), характеристики материала взяты из комплектной библиотеки ANSYS CFX.

Также в качестве исходных данных приняты характеристики охлаждаемого газа и наружного воздуха, соответствующие характеристикам модели среды, поставляемой в комплекте с ПО ANSYS CFX.

### Заключение

Представлены расчётные модели в вычислительной системе ANSYS, предназначенные для последующего проектирования устройства для преобразования тепла в электрическую энергию. В рамках работы выполнены численные модели для расчета трехмерных распределений скорости газового потока, температурных полей, интенсивности турбулентности потока и статического давления.

*Статья подготовлена с использованием результатов работ, выполненных в ходе проекта 02.G25.31.0181 «Разработка сверхмощной энергоэффективной технологии получения алюминия PA-550» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства, утвержденной постановлением Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шахрай С.Г., Кондратьев В.В., Белянин А.В. Энерго- и ресурсосбережение в производстве алюминия. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2014. 146с.
2. Исследования параметров термоэлектрических генераторов изготовленных по толстопленочной технологии / И.Ю. Шелехов и др. // Металлургия: технологии, инновации, качество. Новокузнецк, 2015. С. 373–377.
3. Кондратьев В.В., Ржечицкий Э.П. Пути решения проблемы отложений в аппаратах глиноземного производства // Вестник ИрГТУ. 2011. № 5 (52). С. 120–125.
4. Охлаждение анодных газов алюминиевых электролизеров в теплообменниках нагрева глинозема / С.Г. Шахрай и др. // Металлург. 2015. № 2. С. 29–32.



5. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А. Применение тяжелой смолы пиролиза в качестве компонента связующего для производства анодной массы // *Металлург.* 2015. № 5. С. 72–77.
6. Предварительный нагрев обожженного анода / В.В. Кондратьев и др. // *Цветные металлы.* 2015. № 1 (865). С. 54–56.
7. Снижение энергозатрат в системах газоудаления и газоочистки алюминиевых электролизеров с обожженными анодами / В.В. Кондратьев и др. // *Современное состояние и перспективы улучшения экологии и безопасности жизнедеятельности Байкальского региона "Белые ночи-2016"* : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. Иркутск, 2016. С. 209–218.
8. Белянин А.В., Карлина А.И. Некоторые прикладные аспекты повышения энергетической эффективности алюминиевых электролизеров // *Перспектив Свободный-2016.* Красноярск, 2016. С. 4–9.
9. Разработка мероприятий охлаждения газоходных сетей корпусов электролиза / А.В. Белянин и др. // *Перспектив Свободный-2016.* Красноярск, 2016. С. 10–14.
10. Компондирование как перспективная технология производства альтернативных связующих материалов для производства анодной массы / О.И. Дошлов и др. // *Кокс и химия.* 2015. № 1. С. 34–41.
11. Повышение энергетической эффективности производства алюминия снижением газонапыленности электролита / С.Г. Шахрай // *Системы. Методы. Технологии.* 2015. № 1 (25). С. 103–107.
12. Повышение эффективности газоплавильной в рабочей зоне электролизеров с предварительно обожженными анодами с силой тока свыше 300 КА / В.В. Кондратьев и др. // *Экология и промышленность России.* 2012. № 7. С. 8–11.
13. Kondrat'ev V.V., Ershov V.A., Shakhrai S.G., Ivanov N.A., Karlina A.I. Formation and utilization of nanostructures based on carbon during primary aluminum production // *Metallurgist.* 2016. Т. 60. № 7-8. С. 877–882.
14. Исследование проблемы образования отложений в аппаратах глиноземного производства и пути ее решения / М.Д. Николаев и др. // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона.* 2015. Т. 1. С. 198–208.
15. Кузьмин М.П., Бегунов А.И. Приближенные расчёты термодинамических характеристик интерметаллических соединений на основе алюминия // *Вестник ИрГТУ.* 2013. № 1 (72). С. 98–102.
16. Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю. Повышение эффективности деятельности Иркутского алюминиевого завода за счёт увеличения производства ронделей // *Вестник ИрГТУ.* 2013. № 2 (73). С. 193–197.
17. Кузьмин М.П. Определение устойчивости интерметаллидов в техническом алюминии // *Вестник ИрГТУ.* 2013. № 8 (79). С. 138–143.
18. Kuz'min M.P., Begunov A.I. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminum // *Журнал Сибир. федерал. ун-та. Сер.: Техника и технологии.* 2014. Т. 7. № 2. С. 132–137.
19. Инновационное развитие металлургического комплекса Иркутской области / М.П. Кузьмин и др. // *Вестник ИрГТУ.* 2015. № 5 (100). С. 236–240.
20. Николаев В.Н., Кондратьев В.В. Технологическое решение интенсификации процессов газоудаления и газоочистки алюминиевого производства // *Вестник Иркутского государственного технического университета.* 2012. № 7 (66). С. 142–147.
21. Утилизация теплоты анодных газов алюминиевого электролизера / С.Г. Шахрай и др. // *Цветные металлы.* 2016. № 2 (878). С. 52–56.
22. Анализ влияния повышения силы и плотности анодного тока на показатели работы электролизера Содерберга / С.Г. Шахрай и др. // *Цветные металлы -2011.* Красноярск, 2011. С. 185–192.
23. Ржечицкий Э.П., Кондратьев В.В., Тенигин А.Ю. Технологические решения по охране окружающей среды при производстве алюминия. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2013. 159 с.
24. Шахрай С.Г., Коростовенко В.В., Ребрик И.И. Совершенствование систем колокольного газоотсоса на мощных электролизерах Содерберга. Красноярск : ИПК СФУ, 2010. 146 с.
25. Техничко-экологические и правовые аспекты производства алюминия / В.В. Кондратьев и др. СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2011. 224 с.
26. Влияние коэффициентов фильтрации на достоверность прогноза изменения напряжения алюминиевого электролизера / В.А. Ершов и др. // *Вестник ИрГТУ.* 2010. № 5 (45). С. 184–187.
27. Определение эффективности работы алюминиевых электролизеров при использовании укрупненного глинозема марки Г-00К / Н.В. Евсеев и др. // *Цветные металлы.* 2006. № 12. С. 51–54.
28. Ершов В.А. Автоматическая подача глинозема на электролизерах с боковым токопроводом // *Системы. Методы. Технологии.* 2014. № 4 (24). С. 99–102.



29. Справочник металлурга. Производство алюминия и сплавов на его основе. Иркутск : Изд-во ИрГТУ. 2015. 764 с.
30. Наноструктуры и алюминиевая промышленность / В.В. Кондратьев и др. // Вестник ИрГТУ. 2015. № 8. С. 77–85.
31. Обоснование возможности нагрева глинозема теплом анодных газов алюминиевого электролизера / В.А. Ершов и др. // Вестник ИрГТУ. 2016. № 3 (110). С. 131–138.
32. Радионов Е.Ю., Ершов В.А. Особенности магнитной гидродинамики электролизёров ОА-300 5-ой серии Иркутского алюминиевого завода // Вестник ИрГТУ. 2009. № 4 (40). С. 210–213.
33. Кондратьев В.В., Николаев В.Н., Карлина А.И. Моделирование и лабораторные испытания высокоэффективного теплообменника с низким статистическим сопротивлением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 80–83.
34. Kondrat'ev V., Govorkov A., Lavrent'eva M., Sysoev I., Karlina A.I. Description of the heat exchanger unit construction, created in IRNITU // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Т. 11. № 19. С. 9979–9983.
35. Сысоев И.А., Кондратьев В.В., Шахрай С.Г., Карлина А.И. Разработка способа управления энергетическим режимом электролизеров для производства алюминия // Цветные металлы. 2016. № 5 (881). С. 38–43.

УДК 007, 519.8

*Истомина Алена Андреевна,*  
инженер кафедры технологии электрохимических производств,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
тел. 8(3955) 676-486, e-mail: AlenaIst@ya.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УПРАВЛЕНИИ АССОРТИМЕНТОМ И ТОВАРНЫМИ ЗАПАСАМИ

А. А. Istomina

## MATHEMATICAL MODELS OF DECISION SUPPORT IN ASSORTMENT AND INVENTORY MANAGEMENT

**Аннотация.** Предложена многоэтапная процедура выработки решений по управлению ассортиментом и запасами в условиях неопределенности. В связи с неопределенностью и отсутствием достоверной информации о характеристиках спроса практическое решение задачи управления запасами опирается на многоэтапную процедуру. На первом этапе ищется ассортимент товаров и уровень их объемов, доставляющих максимум прибыли торгового предприятия. На втором этапе, с учетом найденного ассортимента товаров и их объемов, определяется оптимальная стратегия пополнения запасов на горизонте управления, позволяющая снизить издержки торговой организации. Показано, что многие ситуации управления товарными запасами можно рассматривать как задачи массового обслуживания. Разработана математическая модель пополнения запасов партиями на основе теории массового обслуживания, в которой приходится иметь дело с групповыми поставками. Приведены основные характеристики системы массового обслуживания выполнения запасов. Важнейшей особенностью приведенных моделей является возможность получения оптимальных параметров стратегии управления запасами при известном математическом ожидании спроса на товар. Задача управления ассортиментом и запасами имеет высокую размерность, в качестве инструмента снижения размерности и повышения качества управления был предложен ABC-анализ. Для реализации анализа используется дифференциальный метод. Эффективность системы управления в значительной степени зависит от способности дать с приемлемой точностью прогноз спроса на товары. Предложены математические модели прогнозирования спроса на основе анализа временных рядов.

**Ключевые слова:** математические модели, поддержка принятия решения, управление ассортиментом, управление запасами, оптимизация процессов, системы массового обслуживания.

**Abstract.** The multi-stage procedure for decision-making for inventory and assortment management under conditions of uncertainty is proposed. In the first stage we seek a range of products and their volumes, delivering the maximum profit of the trade enterprise. In the second stage, with the found range of products and their volumes, by the optimal strategy of replenishment on the horizon of management, allowing to reduce the costs of the trade organization, is determined. It was shown that many situations of inventory management can be considered as Queuing tasks. The mathematical model of replenishment of stocks by batches on the basis of the theory of mass service in which it is necessary to deal with group deliveries is developed. The main characteristics of a refill are given Queuing system. The most important feature of the proposed model is the possibility of obtaining the optimal parameters of inventory control strategy with known mathematical expectation of demand for goods. The problem of assortment and stocks management has a high dimension, ABC-analysis was proposed as a tool for reducing the dimension and improving the quality of management. To implement the analysis, a differential method is used. The effectiveness of the management system depends to a large extent on the ability to give with an acceptable accuracy the forecast of demand for goods. Mathematical models of demand forecasting based on the analysis of time series are proposed.

**Keywords:** mathematical models, decision support, assortment management, inventory management, process optimization, Queuing systems.