



- ходов производства флотацией / В.В. Кондратьев, А.А. Немаров, А.Э. Ржечицкий, Н.А.Иванов, Н.В. Лебедев ; опубли. 10.12.2013.
27. Исследования свойств и возможности использования кварцита фракции 0-20 мм Черемшанского месторождения / Г.А. Шишкин и др. // Вестник ИрГТУ. 2012. № 8 (67). С. 78–85.
28. Пат. 2578319 Рос. Федерация. Способ выделения углеродных наночастиц из техногенного углеродистого материала / Ржечицкий Э.П., Кондратьев В.В. ; опубли. 27.03.2016.
29. Ознобихин Л.М., Дружинина Т.Я., Немаров А.А. Кинетика мокрого рудного самоизмельчения // Вопросы естествознания. 2015. № 1 (5). С. 79–85.
30. Немаров А.А., Лебедев Н.В. Разработка научных основ повышения производительности флотационных машин и оценка их экономической эффективности // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3 (47). С. 79–82.
31. Немаров А.А., Лебедев Н.В., Карлина Ю.И. Теоретические и экспериментальные исследования параметров пневмогидравлических аэракторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 44–50.
32. Дружинина Т.Я., Немаров А.А., Небогин С.А. Основные типы конструкций отсадочных машин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 88–92.
33. Шахрай С.Г., Гронь В.А., Дружинина Т.Я. Добавка металлических измельчающих тел в мельницу // Вопросы естествознания. 2015. № 1 (5). С. 96–100.
34. Дружинина Т.Я., Шахрай С.Г., Гронь В.А. Крупность и гранулометрический состав исходного питания // Вопросы естествознания. 2015. № 1 (5). С. 65–69.

УДК 66.021

*Дементьев Анатолий Иванович,**к. т. н., доцент, декан технологического факультета, Ангарский государственный технический университет, тел. 8(395)552-36-41, e-mail: andemtev@mail.ru**Подоплелов Евгений Викторович,**к. т. н., доцент, зав. кафедрой машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, тел. 8 (908)650-18-70, e-mail: uch\_sovet@angtu.ru**Мартинюк Владимир Васильевич,**инженер кафедры машин и аппаратов химических производств, Ангарский государственный технический университет, тел. 8(395)551-29-51, e-mail: uch\_sovet@angtu.ru**Корчевин Николай Алексеевич,**д. х. н., профессор кафедры «Техносферная безопасность», Иркутский государственный университет путей сообщения, тел. 8(950)125-48-38, e-mail: rusnatali64@yandex.ru,*

## РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОРИСТОГО МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ТРУБ

*A. I. Dement'ev, E. V. Podoplelov, V. V. Martynyuk, N. A. Korchevin*

### EQUIPMENT FOR APPLYING A POROUS METALLIC COATING ON THE SURFACE OF HEAT EXCHANGER TUBES DEVELOPMENT

**Аннотация.** Водоохлаждаемые теплообменные аппараты являются наиболее распространенным технологическим оборудованием химических и нефтехимических производств. Основными причинами низкой коррозионной стойкости водоохлаждаемых теплообменников являются термодинамическая неустойчивость углеродистых сталей в воде и значительное влияние на коррозию теплофизических и гидродинамических условий процесса теплопередачи. В статье рассматривается новое технологическое оборудование для нанесения металлизированных пористых покрытий на внутреннюю и внешнюю поверхности теплообменных труб со сплошным или спиралевидным покрытием. Покрытие внутри трубы наносится методом электроискрового напыления с использованием дискового цинкового электрода и созданием разности потенциалов между напыляемой поверхностью и электродом. Поступательное движение электрода внутри трубы дает возможность нанесения спиралевидного покрытия. Для напыления покрытия на внешней поверхности трубы предложен станок, в котором одновременно обрабатывается 6–12 труб. Использование металлизированного покрытия позволит снизить скорость коррозии, а применение спиралевидного покрытия на теплообменных трубах приведет к турбулизации потока теплоносителя, увеличению коэффициентов теплоотдачи и повышению эффективности процесса теплопередачи. Расчет коэффициентов теплоотдачи от воды для гладких труб с сегментными перегородками и для труб с пористым металлизированным покрытием показывает возможность их увеличения в 2–4 раза. Таким образом, металлизированное покрытие будет выполнять не только функцию

протекторной защиты, но и создавать турбулизацию потока как в межтрубном, так и в трубном пространствах теплообменника.

**Ключевые слова:** теплообменник, металлизированное пористое покрытие, станок для газотермической металлизации, теплопередача.

**Abstract.** Water-cooled heat exchangers are the most common technological equipment of chemical and petrochemical industries. The main reasons for low corrosion resistance of water cooled heat exchangers are the thermodynamic instability of carbon steels in water and a significant influence on the corrosion of thermal and hydrodynamic conditions of the process of heat transfer. The new technological equipment for porous metallic coating applying on internal and external surfaces of heat-transfer tubes with continuous and spiral coating is considered in the article. The internal coating applies by electro spark sputter with using zinc disk electrode and with setting of a difference in potential between the surface and electrode. The forward movement of electrode inside a tube allows applying spiral coating. The equipment for external coating working with 6–12 tubes is proposed. The use of metallic coating will reduce the rate of corrosion, and the use of the spiral coating on heat transfer tubes will lead to the turbulence of the coolant flow to increase heat transfer coefficients and effectiveness of heat exchange. The calculation of partial heat transfer coefficients from water for smooth tubes with segment barriers and for tubes with porous metallic coating shows the possibility of their 2–4 increase. Thus, the metallic coating will perform not only the function of cathode protection, but also will create turbulence of flow in the annular and tubular spaces of the heat exchanger.

**Keywords:** heat-exchanger, metallic porous coating, machine for thermal spray metallization, heat transfer.

### Введение

Теплообменное оборудование составляет более 50 % от общего количества оборудования, используемого на химических производствах, и относится к наиболее металлоемким видам оборудования, поэтому повышение эффективности работы является актуальной задачей, решение которой позволит снизить металлоемкость и уменьшить габаритные размеры теплообменных аппаратов.

Создать благоприятные условия для конденсации паров или испарения жидкости в теплообменном аппарате можно разными способами, например путем оребрения труб, установкой сегментных перегородок в межтрубном пространстве, использованием турбулизирующих устройств [1–4], покрытием теплообменных труб металлическими сетками, а также нанесением на поверхность труб металлизированных пористых покрытий [5–7]. Одними из наиболее перспективных способов является нанесение алюминиевых или цинковых металлических покрытий на поверхность теплообменных труб [8]. Металлизированные пористые покрытия наносятся на внутреннюю и внешнюю поверхность теплообменных труб. Таким образом, на поверхности труб образуется густая сетка пор и капиллярных каналов, создающая лучшие условия для парообразования или

конденсации паров за счет развитой поверхности напыления. Металлизированные покрытия также способствуют защите теплообменных труб от коррозионного воздействия.

Одним из перспективных направлений для интенсификации теплоотдачи является использование металлизированных (напыленных) труб со спиралевидным покрытием труб теплообменного аппарата. Разработано оборудование, позволяющее наносить на внутреннюю и внешнюю поверхности теплообменных труб металлизированное покрытие в виде спирали (рис. 1), имеющие следующие параметры напыления: высота напыления для внешней поверхности труб составит  $2,0 \div 5,0$  мм, для внутренних – 1,0 мм, шаг напыления – 10 мм.

### Разработка оборудования для нанесения металлизированного покрытия на внутреннюю поверхность теплообменных труб

На внутреннюю поверхность теплообменных труб покрытие наносится методом электроискрового цинкового напыления (рис. 2), заключающегося в искровом напылении цинка на поверхность труб при помощи источника тока, создающего разность потенциалов между напыляемой поверхностью и электродом.

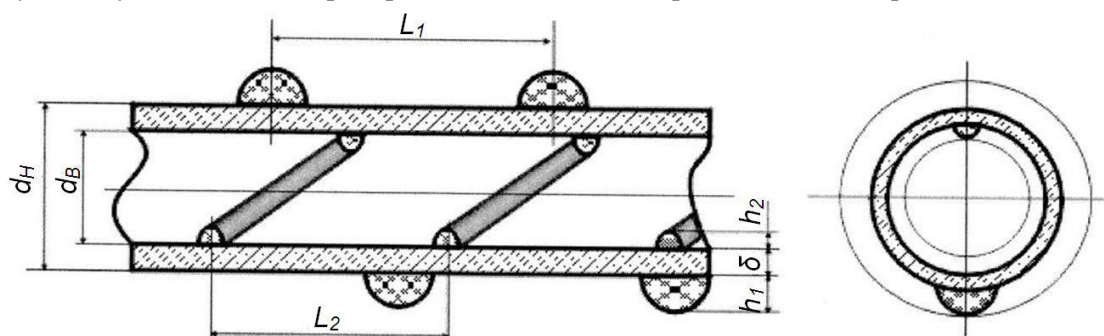
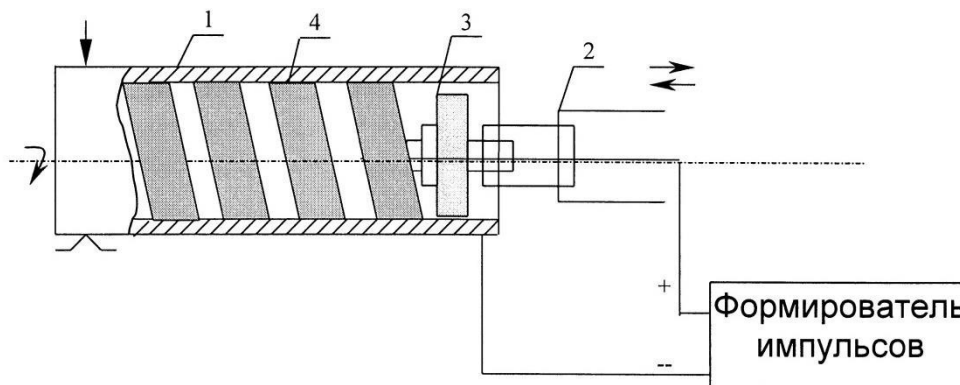


Рис. 1. Конструктивные параметры металлизированного покрытия



**Рис. 2. Внутреннее спиральное электроискровое покрытие:** 1 – напыляемая труба; 2 – телескопическая штанга; 3 – дисковый цинковый электрод; 4 – след напыляемого металла

При контакте цинкового электрода с напыляемой поверхностью происходит короткое замыкание. В результате электрод искроподобным образом расплавляется и, сцепляясь с поверхностью, образует на ней слой металлизированного покрытия. В качестве электрода применяется цинковая проволока. Внутреннее спиральное электроискровое покрытие получается следующим образом (рис. 2). Теплообменная труба закрепляется в пиноль зажимного устройства, дисковый цинковый электрод вводится внутрь трубы на телескопической штанге. Спиральное металлизированное покрытие получается при вращательном движении трубы и поступательном движении телескопической штанги с закрепленным на ней цинковым электродом. Шаг витков напыляемого покрытия можно регулировать с помощью изменения скорости вращения трубы и скорости поступательного движения электрода. Причинами роста теплоотдачи в жидких или парожидкостных средах при использовании спиральных металлизированных покрытий являются:

1) наличие в трубе или коаксиальном зазоре спирального напыления, способствующего уменьшению площади проходного сечения, а также появлению окружная составляющая скорости. Все это приводит к увеличению скорости движения теплоносителя при неизменном его расходе, а соответственно, возрастает коэффициент теплоотдачи;

2) эффект спирального дискретного напыления, который можно оценить по рекомендации [1].

#### **Разработка оборудования для нанесения металлизированного покрытия на внешнюю поверхность теплообменных труб**

Разработан станок, отличающийся от известных конструкций [9–12], позволяющий напы-

лять покрытия одновременно на 6–12 труб. Процесс напыления механизирован за счет использования в конструкции станка зубчатого многопозиционного барабана (рис. 3), который приводится в движение реверсивным двигателем 12 через редуктор 11, клиноременную передачу 10, шестерню 13 и зубчатую пару 8 и 9. Шестерня 13 передает вращение на ходовой винт 16, на котором установлены суппорт 15 и металлизационная головка 14. Таким образом, образуется дифференциал, солнечная шестерня 7 которого приводится в движение шестерней 8, а планетарные шестерни 6 – барабаном-водителем 5. Оси шестерен 6 устанавливаются в корпусе барабана 5 на подшипниках, на концах осей расположены конусные зажимы 4 для фиксации напыляемых труб 3. Аналогично, оси зажимов противоположных концов труб устанавливаются в обойме 2, ось которой связана телескопическим валом 1 с осью барабана. Это позволяет, жестко скрепляя телескопические трубы друг с другом, передавать вращение от барабана к обойме и регулировать расстояние между ними в соответствии с длиной трубы.

Заготовки труб одной длины закрепляют в зажимах обоймы 4 (рис. 3, сечение А–А). Зазор между соседними трубами составляет не более 8 мм. При включении двигателя все подвижные части устройства начинают перемещаться, кроме суппорта 15 с головкой 14, что достигается наличием в начале и в конце ходового винта зоны без резьбы шириной на 20–30 % большей ширины гайки суппорта. Это позволяет находящемуся в этой зоне суппорту не перемещаться продольно при вращении ходового винта. Затем включают головку, настраивая её на рабочий режим. При этом струя напыляемого металла из головки направляется на экран, закрывающий трубы 3. После настройки головки на рабочий режим экран

удаляют и напыляют покрытие на концы труб по диаметру. После нанесения покрытия на концы труб (т. е. после окончания первого оборота барабана-водила) гайку суппорта вручную вводят в зацепление с резьбой ходового винта, и суппорт начинает двигаться вдоль пучка труб, при этом пучок труб вращается вокруг оси и каждая труба вокруг своей оси. Соотношение скоростей этих движений определяется передаточными отношениями зубчатых колёс 5, 13, 9, 8, 7, 6 и шагом резьбы ходового винта и выбирается так, чтобы за время пребывания трубы в зоне напыления она совершила более одного оборота вокруг своей оси, а при отсутствии её в зоне напыления струя перемещалась на расстояние меньше половины диаметра струи. При соблюдении этих соотношений полосы напыления взаимно перекрываются, образуя сплошное покрытие. Когда суппорт доходит до конца пучка труб, он попадает в зону ходового винта без резьбы, в которой покрытие напыляется на другой конец трубы, после чего металлizationная головка отключается, привод останавливается, и трубы с покрытием удаляются из зажимов обоймы и сателлитов.

Устройство характеризуется высокой эффективностью использования распыляемого металла. Это обусловлено тем, что в зоне напыления одновременно находится несколько труб и практически вся металлizationная струя взаимодействует с поверхностью труб.

Исключение составляют периоды, когда ось струи совпадает с зазорами между трубами. Опыт показывает, что если зазор меньше или равен 8 мм, потери металла составляют не более 1 %. Изменением шага ходового винта можно регулировать степень перекрытия полос напыления, а также напылять отдельные кольца на трубы.

На станке осуществляется последовательно несколько операций без переустановки труб, что достигается заменой металлizationной головки в суппорте на другой рабочий орган (например, дробеструйный или красящий пистолет). Станок может быть использован для нанесения пористых сплошных или спиралевидных металлizationных покрытий на поверхности теплообменных труб кожухотрубчатых теплообменников.

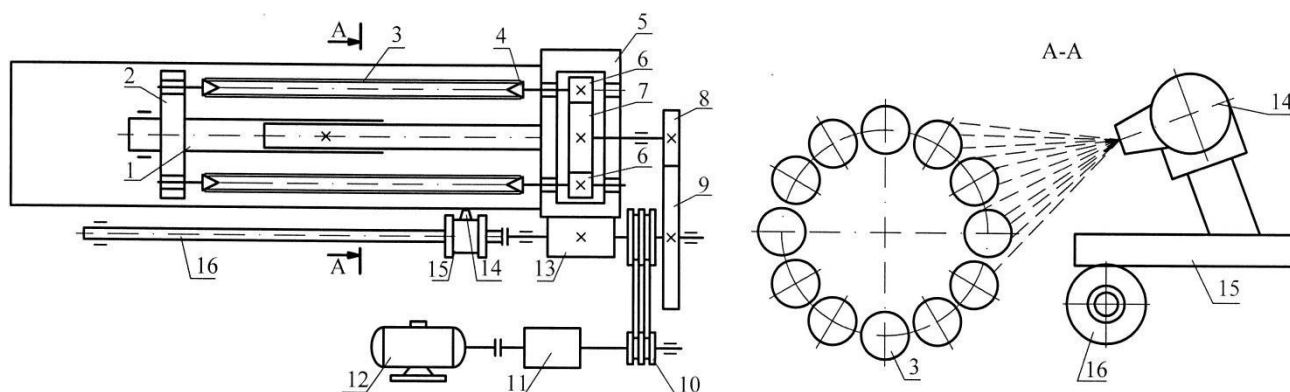


Рис. 3. Станок для газотермической металлizationной наружной поверхности труб

### Сравнение коэффициентов теплоотдачи для гладких и металлizationных теплообменных труб

В качестве объекта исследования выбран кожухотрубчатый теплообменный аппарат с сегментными перегородками, входящий в состав технологической схемы установки ЭЛОУ АВТ-6 Ангарского нефтеперерабатывающего завода АО «Ангарская нефтехимическая компания». Теплообменный аппарат предназначен для конденсации углеводородных соединений, поступающих в трубное пространство. В качестве хладагента используется вода, поступающая в межтрубное пространство теплообменника. Основные технические характеристики теплообменного аппарата,

следующие: диаметр корпуса  $D_b = 1,4$  м, длина корпуса  $l = 9$  м, внешний диаметр теплообменных труб  $d_n = 0,025$  м, внутренний диаметр теплообменных труб  $d_e = 0,02$  м, число труб  $n = 1203$  шт. Для теплообменного аппарата выполнен тепловой расчет, в частности рассчитаны коэффициенты теплоотдачи для воды, движущейся по межтрубному пространству в трубах с металлizationным пористым покрытием и без него. В расчетах принимался расход воды  $V = 116$  м<sup>3</sup>/ч, температура воды начальная  $t_n = 20$  °С, конечная  $t_k = 40$  °С.

Для определения коэффициента теплоотдачи критерий Нуссельта при движении теплоносителя в межтрубном пространстве с сегментными пере-



городками, в случае если на поверхности труб отсутствует напыление, рассчитывался [13]:

$$Nu = 0,2Re^{0,6} \cdot Pr^{0,33},$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

Скорость рассчитывалась по приведенному сечению:

$$S_{прив} = \frac{S_{межтруб} \cdot h \cdot \psi}{l_{прив}},$$

где  $S_{межтруб}$  – сечение межтрубного потока;

$h = \frac{0,25D_b}{1,415\psi}$  – расстояние между перегородками;

$l_{прив} = h - \frac{2}{3}D_b$  – приведенная длина потока;

$$\psi = \frac{1 - \frac{d_n}{t}}{1 - 0,99\left(\frac{d_n}{t}\right)^2}; t = 32 \text{ мм} - \text{ шаг труб.}$$

Коэффициент теплоотдачи определялся из уравнения

$$\alpha_{воды} = \frac{\lambda}{d_n} \cdot Nu,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воды.

По результатам расчета коэффициент теплоотдачи для воды, движущейся между гладкими трубами в межтрубном пространстве, составил 1627 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

При расчете коэффициента теплоотдачи для воды в случае напыленной поверхности труб использовалось уравнение, применимое для шахматного пучка труб, оребренных навивкой проволоочной спирали [14]:

$$Nu = 2,8Re^{0,46} \left(\frac{d_n}{L}\right)^{-0,6} \cdot \left(\frac{l_0}{h}\right)^{0,36},$$

где  $h = 2$  мм – высота напыления;  $L = 10$  мм – шаг витков напыленной спирали;  $l_0 = \frac{\pi \cdot d_n}{z}$  – шаг напыления;  $z = 40$  – число витков спирали.

Определяющими параметрами при расчете коэффициента теплоотдачи являются: шаг витков напыленной спирали  $L$ , скорость потока в узком сечении, средняя температура теплоносителя. Коэффициент теплоотдачи для воды при движении ее между трубами с напыленным металлизированным покрытием рассчитывался по формуле

$$\alpha_{воды} = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu.$$

По результатам расчета коэффициент теплоотдачи для воды составил 3652 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

### Заключение

Таким образом, в случае напыления труб дискретным покрытием коэффициент теплоотдачи со стороны воды увеличивается в 2,2 раза. Полученный результат можно объяснить следующим образом. В пористом слое напыленного металлизированного покрытия, образующем густую сетку пор и ходов, наилучшие условия для парообразования. Первые пузырьки пара при кипении появляются в наиболее благоприятных местах поверхности, а именно в углублениях, в которых остаются частички газа, выполняющие роль паровых зародышей [7], причем чем больше таких центров парообразования, тем интенсивнее процесс теплообмена. Расчетным путем установлено, что по сравнению с гладкими трубами коэффициент теплоотдачи для напыленных труб в зависимости от высоты напыления спирали и шага витков увеличивается в 2–4 раза [15, 16]. Применение теплообменных труб с пористыми металлизированными покрытиями по сравнению с оребренными трубами позволит уменьшить длину теплообменных труб в 2–2,5 раза, при этом примерно в 1,5–2 раза уменьшается диаметр обечайки и крышек аппарата, в результате снижается металлоемкость теплообменного аппарата.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дементьев А.И., Соловьев А.Р., Подоплелов Е.В. Интенсификация работы теплообменного аппарата с использованием спирально-профилированных труб. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2016. Т. 1. № 1. С. 9–10.
2. Шукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1970.
3. А.с. 2359192 РФ. Теплообменник типа «труба в трубе» / Г.Я. Ахмедов; опубл. 20.06.09.
4. Кустов Б.О., Бальчугов А.В. Анализ методов интенсификации теплообменных процессов в теплообменниках с подвижными элементами // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2017. Т. 1. № 1. С. 43–44.
5. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Соловьев А.Р. Метод создания металлизированных пористых покрытий на теплообменных поверхностях // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2016. Т. 1. № 1. С. 7–8.



6. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В. Исследование теплообмена на пористой структуре металлических покрытий // Сб. науч. трудов Ангарск. гос. техн. акад. Т. 1. Ангарск, 2014. С. 103–105.
7. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Антонов Л.А. Математическое моделирование теплового процесса в металлизированном пористом слое. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2015. Т. 1. № 1. С. 47–49.
8. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Антонов Л.А., Корчевин Н.А. Математическая модель тепловых процессов в слое пористого металлического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск, 2014. № 2. С. 179–183.
9. Хасуй А. Техника напыления : пер. с япон. М. : Машиностроение, 1975. 268 с.
10. Антошин Е.В. Газотермическое напыление покрытий. М. : Машиностроение, 1974. 96 с.
11. Троицкий А.Ф. Основы металлизации распылением. Ташкент : Госиздат УзССР, 1965. 184 с.
12. Металлизация распылением / Н.В. Катц и др. М. : Машиностроение, 1966. 196 с.
13. Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Ангарск, 2006. 744 с.
14. Чернобыльский И.И. Машины и аппараты химических производств. М. : Химия, 1975. 457 с.
15. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В. Исследование теплообмена на пористой структуре. Современные технологии и научно-технический прогресс. 2014. Т. 1. № 1. С. 18.
16. Дементьев А.И., Подоплелов Е.В., Соловьев А.Р. Интенсификация процесса конденсации углеводородных соединений в теплообменном аппарате // Сб. науч. трудов Ангарск. гос. техн. ун-та. 2016. № 1. С. 6–10.

УДК 658.512, 004.942

*Лаврентьева Мария Вячеславовна*

*программист, Иркутский национальный исследовательский технический университет, тел. 8(902)175-78-33, e-mail: mira.amazon@gmail.com*

*Чимитов Павел Евгеньевич,*

*к. т. н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, тел. 8 (3952) 40-54-19, e-mail: chimitov\_pe@istu.edu*

*Карлина Юлия Игоревна,*

*магистрант института авиационного машиностроения и транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, тел. 8 (914) 879-85-05, e-mail: asup@irzirk.ru*

## РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РАСПОЗНАВАНИЯ 3D–МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЙ АВИАМАШИНОСТРОЕНИЯ

*M. V. Lavrentieva, P. E. Chimitov, U. I. Karlina*

## REALIZATION OF THE MACHINE-BUILDING PRODUCTS 3D MODEL RECOGNITION ALGORITHM

**Аннотация.** В условиях жесткой конкуренции на рынке перед промышленными предприятиями возникает практическая задача организации интегрированной информационной среды создания изделия. Основной целью создания интегрированной информационной среды на различных предприятиях, в том числе на предприятии «Иркутский авиационный завод», является повышение качества принимаемых решений, ускорение процессов подготовки производства и освоение технологий изготовления новых изделий. Это требует тщательного выбора комплекса систем (CAD/CAM/CAE/PDM), обеспечивающих основу интеграции конструкторско-технологической подготовки производства и наиболее полно учитывающих особенности выпускаемых изделий и процессов их изготовления. Важно правильно решить эту задачу, так как инвестиции в области автоматизации определяют конкурентоспособность предприятия на годы вперед. Данная статья посвящена проблемам разработки и реализации методики распознавания объектов электронной модели мало жесткого изделия авиационной техники с использованием средств NX OPEN API в графической среде Siemens NX, проиллюстрированного на примере одного из элементов конструкции изделия – отбортовки. Описан алгоритм выявления структурно-геометрических параметров изделия и группирования характеристик сходимости объектов кластеризации на основе аппаратов векторной алгебры и теории графов. Предложенный алгоритм применим для формализации решения ряда задач конструкторской и технологической подготовки производства, а также для усовершенствования систем поддержки принятия решений, использующих данные электронной модели изделия, при минимальном участии и под контролем специалиста.

**Ключевые слова:** электронная модель изделия, распознавание, Siemens NX, конструктивный элемент, классификатор.

**Abstract.** In the conditions of severe competition in the market, industrial enterprises face the practical task of organizing an integrated information environment for product creation. The main goal of creating an integrated information environment at various enterprises, including the Irkutsk Aviation Plant, is to improve the quality of the decisions made, accelerate the production preparation processes and master the technologies for manufacturing new products. This requires a careful choice of a set of systems (CAD / CAM /