

ISSN 0136-5835  
e-ISSN 2542-1409  
DOI: 10.17277/issn.0136-5835

**ВЕСТНИК  
Тамбовского  
государственного  
технического  
университета**

***TRANSACTIONS  
of the Tambov  
State  
Technical  
University***

***2017. Том 23. № 4.***

**Четырехязычный  
научно-теоретический  
и прикладной журнал  
широкого профиля**

***Four-Language  
Scientific-Theoretical and  
Applied Multidisciplinary  
Journal***

**<http://vestnik.tstu.ru>**

**Россия      Тамбов  
Издательство ТГТУ**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Автоматика. Информатика.</b>	
<b>Управление. Приборы</b> .....	548
<b>Матвейкин В. Г., Ишин А. А., Скворцов С. А., Дворецкий С. И.</b> Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода .....	548
<b>Джамбеков А. М., Щербатов И. А.</b> Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций .....	557
<b>Кудряшов В. С., Тихомиров С. Г., Рязанцев С. В., Иванов А. В., Козенко И. А.</b> Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака .....	572
<b>Синдеев С. В., Фролов С. В., Потлов А. Ю.</b> Система поддержки принятия решений врача при оценке предоперационного состояния больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения .....	581
<b>Чернышова Т. И., Курносков Р. Ю.</b> Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя .....	589
<b>Панасюк Ю. Н., Пудовкин А. П., Рогачёв А. И.</b> Метод повышения точности третичной обработки информации с применением динамических весовых коэффициентов .....	595
<b>Дивин А. Г., Балабанов П. В., Шишкина Г. В., Мозгова Г. В.</b> Макет роботизированного комплекса для сортировки сельскохозяйственной продукции .....	601
<b>Калинин В. Ф., Зяблов Н. М., Кочергин С. В., Кобелев А. В., Джапарова Д. А.</b> Анализ методов представления данных искусственной нейронной сети для управления электроэнергетическими системами .....	609
<b>Герасимова Е. Б., Герасимов Б. И., Гудошников В. В., Стреха А. А., Сизикин А. Ю.</b> Идентификация структуры документов по стандартизации: документы по стандартизации на множестве состояний функционирования .....	617
<b>Процессы и аппараты химических и других производств. Химия</b> .....	626
<b>Капранова А. Б., Верлока И. И., Бакин М. Н., Яковлев П. А.</b> Методика расчета ленточного конвейера для смешительного аппарата с подвижной лентой .....	626
<b>Леонтьева А. И., Балабаева Н. Н., Брянкин К. В., Кхзаал Аль Фадхли Кхзаал Хамид, Ахмет Аль Рубай Раафат Абдурахман</b> Формирование структуры водонефтяных эмульсий .....	635
<b>Абоносимов О. А., Кузнецов М. А., Ковалева О. А., Поликарпов В. М., Дмитриев В. М.</b> Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях .....	641
<b>Иванов О. О., Парфенова Е. А., Долгунин В. Н.</b> Технология подготовки зернового сырья для биоконверсии с повышенной экстрактивностью .....	656

## CONTENTS

<b>Automation. Information Technology.</b>	
<b>Control. Instruments</b> .....	548
<b>Matveykin V. G., Ishin A. A., Skvortsov S. A., Dvoretzky S. I.</b> Automation of the Process of Gas Mixtures Adsorptive Separation and Hydrogen Production .....	548
<b>Dzhambekov A. M., Shcherbatov I. A.</b> Optimal Control of the Process of Catalytic Reforming of Petrol Fractions .....	557
<b>Kudryashov V. S., Tikhomirov S. G., Ryazantsev S. V., Ivanov A. V., Kozenko I. A.</b> A Method of Simulation of a Multilift Digital System of Controlling the Process of Ammonia Synthesis.....	572
<b>Sindeev S. V., Frolov S. V., Potlov A. Yu.</b> Decision-Making Support System for Doctors to Assess the Preoperative State of Patients with Acute Brain Circulation Disorders.....	581
<b>Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu.</b> Application of Mathematical Modeling Methods in the Assessment of Metrological Reliability of Analog-to-Digital Converter Unit.....	589
<b>Panasyuk Yu. N., Pudovkin A. P., Rogachev A. I.</b> A Method of Increasing the Accuracy of Tertiary Information Processing Using Dynamic Weighting Coefficients .....	595
<b>Divin A. G., Balabanov P. V., Shishkina G. V., Mozgova G. V.</b> A Model of Robotic Sorting Facility for Agricultural Products.....	601
<b>Kalinin V. F., Zyablov N. M., Kochergin S. V., Kobelev A. V., Dzhaparova D. A.</b> The Analysis of Methods of Data Presentation of Artificial Neuron Networks for Electric Power Systems Control.....	609
<b>Gerasimova E. B., Gerasimov B. I., Gudoshnikov V. V., Strekha A. A., Sizikin A. Yu.</b> Identification of the Structure of Standardization Documents: Standardization Documents on the Set of States of Functioning .....	617
<b>Chemical and Related Engineering.</b>	
<b>Chemistry</b> .....	626
<b>Kapranova A. B., Verloka I. I., Bakin M. N., Yakovlev P. A.</b> A Method of Designing the Belt Conveyor for Mixer with Movable Belt .....	626
<b>Leontieva A. I., Balabayeva N. N., Bryankin K. V., Al Fadhli Khazal Khamid Khazaal, Al Rubai Raafat Abdurahman Ahmet.</b> The Formation of the Structure of Water-Oil Emulsions .....	635
<b>Abonosimov O. A., Kuznetsov M. A., Kovaleva O. A., Polikarpov V. M., Dmitriev V. M.</b> Kinetic Dependencies and Technological Effectiveness of Electrochemical Membrane Separation of Sewage Waters at Enterprises .....	641
<b>Ivanov O. O., Parfenova E. A., Dolgunin V. N.</b> The Technology of Preparing Raw Grain for Bioconversion with High Extract Content.....	656

<b>Скопинец И. В., Божко Г. В., Носков С. А., Нечаев В. М.</b> Определение краевого угла смачивания оросителей градирни из полимерных композиционных материалов .....	665
<b>Савельева Е. А., Дикун М. П.</b> Эффективность очистки медьсодержащих растворов импульсным электролизом .....	672
<b>Севостьянов В. С., Уральский В. И., Бойчук И. П., Перельгин Д. Н., Ермилов Р. А.</b> Технологический комплекс и агрегаты для получения высокодисперсных и ультрадисперсных материалов .....	680
<b>Машиностроение. Металлообработка</b> .....	688
<b>Ванин В. А., Колодин А. Н., Родина А. А.</b> Формообразующие цепи металлорежущих станков на основе гидравлических связей.....	688
<b>Материаловедение. Нанотехнологии</b> .....	698
<b>Кучерова А. Е., Буракова И. В., Бураков А. Е., Брянкин К. В.</b> Изотермы адсорбции ионов свинца (II) графеновыми нанокompозитами .....	698
<b>Филатов И. С., Буренина А. И., Черкасова А. С.</b> Получение пористых связок системы «медь – железо – олово» и исследование влияния химического состава на пористость .....	707
<b>Информация</b> .....	712
<b>Итоги</b> первого расширенного заседания Технического Комитета по стандартизации ТК 393 «Услуги (работы) в сфере ЖКХ и формирования комфортной городской среды» (К. Н. Савин) .....	712
<b>Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук</b> .....	714
<b>Указатели к тому 23, 2017</b> .....	715
Содержание тома 23, 2017 .....	715
Алфавитный указатель авторов .....	722

<b>Skopintsev I. V., Bozhko G. V., Noskov S. A., Nechaev V. M.</b> Determination of the Wetting Angle of Sprinklers for Cooling Towers Made of Composite Materials .....	665
<b>Savelieva E. A., Dikun M. P.</b> The Efficiency of Cleaning of Copper Solutions by Pulsed Electrolysis.....	672
<b>Sevostyanov V. S., Uralsky V. I., Boychuk I. P., Perelygin D. N., Ermilov R. A.</b> Technological System and Units for Manufacturing of Fine and Ultrafine Materials.....	680
<b>Mechanical Engineering. Metal Treatment</b> .....	688
<b>Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A.</b> Forming Chains of Metal-Cutting Machines Based on Hydraulic Connections .....	688
<b>Material Science. Nanotechnology</b> .....	698
<b>Kucherova A. E., Burakova I. V., Burakov A. E., Bryankin K. V.</b> Graphene Composites for Lead (II) Extraction: an Equilibrium Study.....	698
<b>Filatov I. S., Burenina A. I., Cherkasova A. C.</b> Obtaining Porous Bindings of the “Copper – Iron – Tin” System and Research into the Influence of Chemical Composition on Porosity.....	707
<b>Information</b> .....	712
<b>Summing up the Result of the Meeting of the Technical Committee on Standardization TC 393 “Communal Services and Creating Comfortable Urban Environment” (K. N. Savin)</b> .....	712
<b>New Professors, Doctors and Candidates of Sciences</b> .....	714
<b>Indexes to Volume 23, 2017</b> .....	715
Contents to Volume 23, 2017 .....	715
Author Index .....	722

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОГО  
РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ  
И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА**

**В. Г. Матвейкин<sup>1</sup>, А. А. Ишин<sup>2</sup>, С. А. Скворцов<sup>1</sup>, С. И. Дворецкий<sup>3</sup>**

*Кафедры: «Информационные процессы и управление» (1),  
«Технологии и оборудование пищевых и химических производств» (3),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» г. Тамбов, Россия; sdvoretzky@tstu.ru;  
ООО «Энерготехпроект» (2), г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** водород; динамика; изотерма адсорбции; кинетика; короткоцикловая безнагревная адсорбция; математическая модель; многокомпонентная газовая смесь; оптимизация; управление; цеолитовый адсорбент.

**Аннотация:** Сформулирована задача оптимизации режимных переменных (давления на стадии адсорбции и времени цикла адсорбции) и разработана двухуровневая система адаптивной оптимизации процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода максимальной чистоты в четырех-адсорберной установке короткоцикловой безнагревной адсорбции с гранулированным цеолитовым адсорбентом СаА. Проведено численное исследование эффективности функционирования системы адаптивного управления при ступенчатом изменении возмущающих воздействий (концентрации диоксида углерода, температуры и давления газовой смеси) в питании установки короткоцикловой безнагревной адсорбции.

---

**Введение**

Циклические адсорбционные процессы широко применяют в промышленности для разделения углеводородов, концентрирования водорода, кислорода, диоксида углерода и др. газов, безнагревной осушки газов, извлечения метана и т.п. Одной из актуальных задач в области адсорбционного разделения является получение водорода из водородсодержащих технологических потоков (газы конверсии и окисления углеводородов, нефтезаводские газы, синтез-газ и др.) [1]. Типичными веществами, сопутствующими водороду, являются азот, оксид и диоксид углерода, метан. Целью данной работы является анализ циклического процесса адсорбционного обогащения газовой смеси водородом как объекта управления и разработка системы автоматического управления данным процессом, обеспечивающей поддержание максимальной концентрации продукционного водорода при выполнении регламентных технологических условий (ограничений).

## Анализ процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовых смесей как объекта управления

Анализ процесса короткоциклового безнагревной адсорбции (КБА) обогащения газовой смеси водородом как объекта исследования позволил определить [2, 3]:

– входные переменные  $\mathbf{x}$  (возмущающие воздействия) установки КБА (состав  $\mathbf{y}^{in} = (y_1^{in}, y_2^{in}, y_3^{in})$ , температуру  $T_g^{in}$ , расход  $G^{in}$  и давление  $P^{in}$  газовой смеси в питании установки, давления на продукционном  $P_{H_2}^{out}$  и на сбросном  $P_{CO_2}^{out}$  выходах установки КБА), то есть  $\mathbf{x} = \{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\}$  (рис. 1);

– режимные (управляющие) переменные  $\mathbf{u}$  (давление  $P_{ads}$  и время цикла адсорбции  $\tau_{ads}$ ), то есть  $\mathbf{u} = \{P_{ads}, \tau_{ads}\}$  (рис. 1);

– выходные переменные  $\mathbf{y}$  установки КБА (состав  $\mathbf{y}^{out} = (y_1^{out}, y_2^{out}, y_3^{out})$ , расходы  $G^{out}$ ,  $G^p$  и температуру  $T_g^{out}$  газовой смеси на выходе из установки КБА, производительность установки  $Q = y_1^{out} \cdot G^p$ , где  $G^p = G^{out} - G^{des}$ ,  $G^{des}$  – объемный расход потока, обогащенного водородом, направляемого на регенерацию адсорбента), то есть  $\mathbf{y} = \{y^{out}, G^{out}, G^p, T_g^{out}, Q\}$  (рис. 1).

При математическом описании процесса обогащения газовой смеси водородом в установке КБА принимали следующие допущения [2, 4]: 1) исходная газовая смесь является трехкомпонентной (содержит  $H_2$  с концентрацией  $(65 \pm 2)$  % об. (в формулах используется индекс «1»),  $CO_2$  с концентрацией  $(34 \pm 2)$  % об. (индекс «2»),  $CO$  с концентрацией  $(1 \pm 0,5)$  % об. (индекс «3»)) и рассматривается как идеальный газ, что вполне допустимо при давлении в адсорбере до  $200 \times 10^5$  Па; 2) в качестве адсорбента используется гранулированный цеолит СаА с диаметром гранул 1,5 мм, коэффициентом пористости гранул  $\sim 0,394$  и диаметром транспортных пор  $d \leq 0,5 \times 10^{-3}$  м; 3) геометрические размеры адсорбционного слоя считаем постоянными в течение заданного срока эксплуатации  $\sim 10^5$  ч; 4) слой адсорбента представляет собой сплошную среду с коэффициентом порозности  $\epsilon$ ; 5) десорбционная ветвь изотерм сорбции  $H_2$ ,  $CO_2$  и  $CO$  на гранулированном цеолите СаА совпадает с адсорбционной и носит нелинейный характер. В соответст-



**Рис. 1. Схема четырехадсорберной установки КБА как объекта управления при обогащении газовой смеси водородом**

врии с принятыми допущениями математическое описание процесса концентрирования водорода в потоке газовой смеси включает уравнения покомпонентного материального и теплового балансов в потоке газовой смеси по высоте слоя адсорбента (параболические дифференциальные уравнения второго порядка); уравнение массопереноса адсорбтива ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ) из газовой фазы в твердую фазу адсорбента (через границу раздела фаз); уравнение изотермы сорбции Ленгмюра–Фрейндлиха для расчета равновесной концентрации адсорбтива на внешней поверхности гранул адсорбента; уравнение Эргуна, связывающее изменение давления и скорости газовой смеси по высоте адсорбента; начальные и граничные условия для системы параболических дифференциальных уравнений второго порядка [2].

### Постановка задачи оптимизации установившегося технологического режима

Задача оптимизации технологического процесса получения водорода по технологии КБА может быть сформулирована следующим образом: при заданных диапазонах изменения возмущающих воздействий

$$\mathbf{x} = \{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\}$$

требуется найти вектор оптимальных управляющих воздействий  $\mathbf{u}^* = (P_{ads}, \tau_{ads})$ , при котором целевая функция (среднее значение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода на заданном периоде  $[0, t_{pr}]$  функционирования установки КБА) достигает экстремального значения, то есть

$$I(\mathbf{u}^*) = \left( \frac{1}{t_{pr}} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}^*) dt \right) = \max_{\mathbf{u}=\{P_{ads}, \tau_{ads}\}} \left( \frac{1}{t_{pr}} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}) dt \right), \quad (1)$$

выполняются связи в форме уравнений математической модели [2, 3] и ограничения:

– по концентрации продукционного водорода  $y_1^{out}$

$$\underline{y_1^{out}} - y_1^{out} \leq 0, \quad (2)$$

– производительности  $Q_{H_2}$  установки КБА

$$\underline{Q} \leq Q \leq \overline{Q}, \quad (3)$$

– расходу газовой смеси  $G^{in}$  в питании установки КБА

$$\underline{G^{in}} \leq G^{in} \leq \overline{G^{in}}, \quad (4)$$

– давлению на стадии адсорбции  $P_{ads}$

$$P^{in} \leq P_{ads}, \quad (5)$$

где черта внизу (вверху) – нижние (верхние) предельно допустимые значения технологических переменных.

Сформулированная задача (1)–(5) относится к классу задач нелинейного программирования, для ее решения будем использовать методы штрафных функций и последовательного квадратичного программирования [5].

## Автоматизация процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовых смесей

Для оперативного решения задачи оптимизации (1) – (5) и управления процессом получения водорода разработана двухуровневая система адаптивной оптимизации и управления.

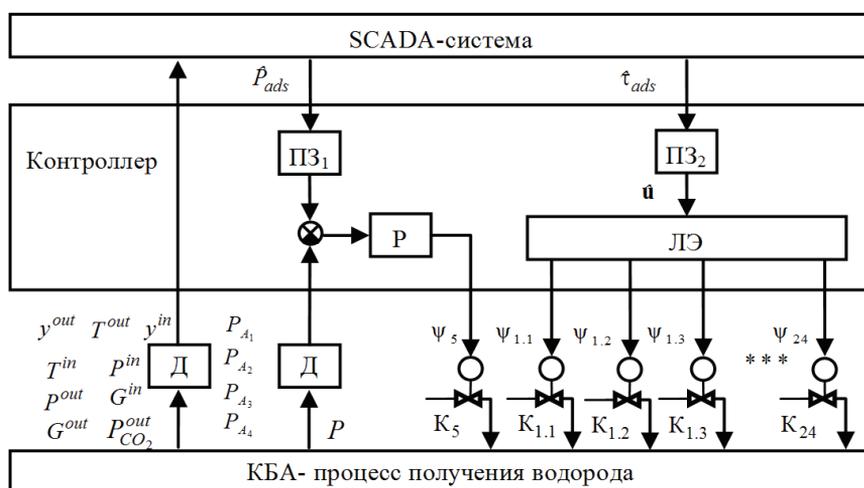
Технологические переменные установки адсорбционного получения водорода подвержены случайным изменениям в ходе процесса адсорбции. Значения возмущений, которые представлены нерегулируемыми переменными исходной газовой смеси в питании установки КБА, в ходе процесса также меняются случайным образом. В этом случае необходимо поддерживать априори неизвестное максимальное значение заданной целевой функции оптимизации, что обуславливает применение системы адаптивной оптимизации и управления с изменяемыми заданиями автоматическим регуляторам, работающей по принципу управления по возмущению с эталонной моделью технологического процесса в контуре управления [6, 7].

В системе адаптивной оптимизации и управления осуществляется непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих воздействий и при их отклонении от номинальных значений на верхнем уровне с помощью персонального компьютера оперативно решается задача оптимизации (1) – (5) и определяются текущие оптимальные задания  $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{P}_{ads}, \hat{\tau}_{ads})$  регуляторам автоматической системы регулирования технологического процесса получения водорода, функционирующей на нижнем уровне.

На основании полученного значения  $\hat{\tau}_{ads}$  пересчитывается циклограмма  $\hat{U}$  работы клапанов и с помощью программного задатчика ПЗ<sub>2</sub> и логического элемента ЛЭ осуществляется ее реализация в установке КБА. Текущее оптимальное значение  $\hat{P}_{ads}$  поступает в качестве задания ПИД-регулятору одноконтурной системы автоматического регулирования с обратной связью (рис. 2).

Таким образом, система адаптивной оптимизации и управления режимами функционирования установки КБА обеспечивает выполнение следующих функций:

- поиск и поддержание оптимального значения чистоты получаемого водорода  $y_1^{out}$ ;

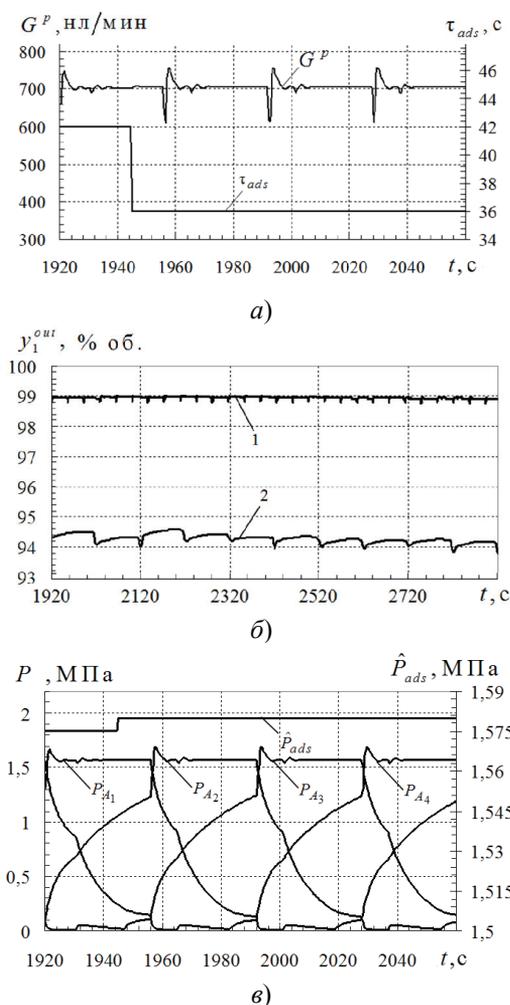


**Рис. 2. Структурная схема системы управления:**  
 $\Psi$  – степень открытия клапана; Д – датчик; Р – регулятор;  
 ЛЭ – логический элемент; ПЗ – программный задатчик

- расчет текущего оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$ ;
- расчет и реализация оптимальной циклограммы работы клапанов в установке КБА для получения водорода;
- расчет текущего оптимального давления на стадии адсорбции  $\hat{P}_{ads}$ ;
- расчет и формирование управляющих воздействий на приводы клапанов.

### Имитационное исследование системы управления

На рисунке 3 представлены результаты имитационных исследований функционирования системы управления при ступенчатом повышении температуры  $T_g^{in}$  исходной смеси от 30 до 50 °С.

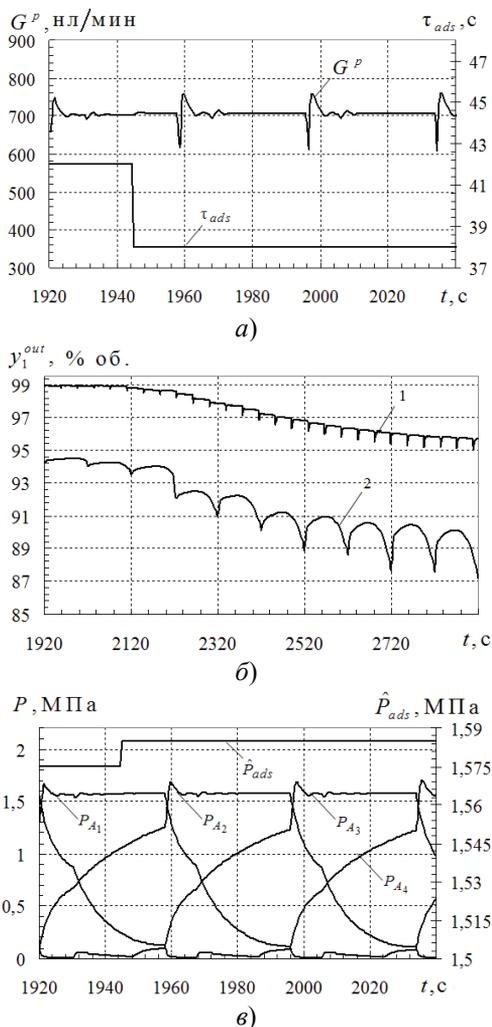


**Рис. 3. Переходные процессы в системе управления при ступенчатом повышении температуры исходной смеси:**

- a* – изменение расхода  $G^P$  продукционного водорода и оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$  в зависимости от времени  $t$ ;
- б* – изменение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода в зависимости от времени при наличии 1 и отсутствии 2 адаптивной оптимизации;
- в* – изменение давлений в адсорберах  $A_1 - A_4$  установки

Анализ показывает, что система управления компенсирует ступенчатое возмущение уменьшением длительности  $\tau_{ads}$  стадии адсорбции с 42 до 36 с (рис. 3, а). При этом система управления обеспечивает поддержание концентрации продукционного водорода на уровне  $\sim 99\%$  об. и расхода  $G^P$  продукционного водорода на минимально допустимом уровне (рис. 3, а), в то время как в установке КБА без адаптивной оптимизации концентрация продукционного водорода устанавливается на уровне  $\sim 94\%$  об. (рис. 3, б).

На рисунке 4 представлены результаты имитационных исследований функционирования системы управления при ступенчатом повышении содержания  $\text{CO}_2$  в исходной смеси  $y_2^{in}$  от 34 до 45 % об. В данном случае система управления



**Рис. 4. Переходные процессы в системе управления при ступенчатом повышении содержания  $\text{CO}_2$  в исходной смеси:**

- а – изменение расхода  $G^P$  продукционного водорода и оптимального времени цикла адсорбции  $\hat{\tau}_{ads}$  в зависимости от времени;
- б – изменение концентрации  $y_1^{out}$  продукционного водорода в зависимости от времени при наличии 1 и отсутствии 2 адаптивной оптимизации;
- в – изменение давлений в адсорберах  $A_1$ – $A_4$  установки

Таблица 1

## Результаты сравнительного анализа работы установки КБА

Возмущающее воздействие – ступенчатое увеличение	$I^*$ , % об.	$I$ , % об.	$\Delta I$ , % об.
$T_g^{in}$ от 30 до 50 °С	98,92	94,13	4,79
$y_2^{in}$ от 34 до 45 % об.	95,76	89,46	6,3
$P_{H_2}^{out}$ до 0,3 МПа	98,92	95,09	3,83
$P_{CO_2}^{out}$ до 0,1 МПа	96,51	90,22	6,29

Примечание:  $I^*$ ,  $I$  – значения целевой функции при наличии и без адаптивной оптимизации в системе управления соответственно;  $\Delta I$  – изменение целевой функции.

минимизирует снижение чистоты продукционного водорода, обеспечивая поддержание концентрации продукта на максимально возможном уровне для изменившихся характеристик исходной смеси. Система управления с адаптивной оптимизацией более эффективна по сравнению с системой без адаптивной оптимизации (рис. 4, б).

Результаты сравнительного анализа работы установки КБА при наличии и отсутствии адаптивной оптимизации в системе управления представлены в табл. 1.

### Заключение

Математическое, информационное и алгоритмическое обеспечение двухуровневой системы адаптивной оптимизации и управления статическими режимами функционирования установки КБА могут быть использованы при проектировании новых автоматизированных процессов и адсорбционных технологических установок с циклически изменяющимся давлением для разделения и очистки многокомпонентных газовых смесей.

*Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ.*

#### Список литературы

1. Ruthven, D. M. Pressure Swing Adsorption / D. M. Ruthven, S. Farooq, K. S. Knabel. – New York : VCH Publishers, 1994. – 352 p.
2. Mathematical Modeling of Hydrogen Production Process by Pressure Swing Adsorption Method / E.I. Akulinin [et al.] // Advanced Materials and Technologies. – 2017. – No. 2. – P. 38 – 49. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.038-049
3. Ишин, А. А. Математическое моделирование и управление процессом получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Ишин Андрей Анатольевич. – Тамбов, 2017. – 152 с.
4. Akulinin, E. Modeling and Automation of Adsorption Processes with Cyclically Changing Pressure During the Separation of Gas Mixture / E. Akulinin, A. Ishin, S. Skvortsov // 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017 : Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 17 : Energy and Clean Technologies, Issue 41. – P. 527 – 534.

5. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : в 2-х кн. : пер. в англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М. : Мир, 1986. – 2 кн.

6. Симонов, М. С. Исследование динамических режимов пневматического концентратора кислорода / М. С. Симонов, С. А. Скворцов, М. М. Шлыков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, вып. 4. – С. 987 – 990.

7. Васильев, А. С. Исследование режимов концентраторов кислорода с учетом их конструктивных особенностей / А. С. Васильев, Т. А. Лапина, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, вып. 4. – С. 1007 – 1011.

---

## Automation of the Process of Gas Mixtures Adsorptive Separation and Hydrogen Production

V. G. Matveykin<sup>1</sup>, A. A. Ishin<sup>2</sup>, S. A. Skvortsov<sup>1</sup>, S. I. Dvoretzky<sup>3</sup>

*Department of Information Processes and Control (1),  
Department of Technology and Equipment for Food and Chemical Production (3),  
TSTU, Tambov, Russia; sdvoretzky@tstu.ru;  
LLC “Energotehproekt” (2), Tambov, Russia*

**Keywords:** adsorption isotherm; control; dynamics; hydrogen; kinetics; mathematical model; multicomponent gas mixture; optimization; short-cycle heatless adsorption; zeolite adsorbent.

**Abstract:** The problem of optimizing the regime variables (adsorption stage pressure and the adsorption cycle time) is formulated and the 2-level system for adaptive optimization of the process of gas mixtures adsorptive separation and hydrogen production with maximum purity in the 4-bed short-cycle heatless adsorption unit with a granular zeolite adsorbent CaA is developed. A numerical study of the efficiency of the adaptive control system with a step change of disturbances (carbon dioxide concentration, temperature and pressure of the gas mixture) on input of the short-cycle heatless adsorption unit was carried out.

### References

1. Ruthven D.M., Farooq S., Knaebel K.S. *Pressure swing adsorption*, New York: VCH Publishers, 1994, 352 p.

2. Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretzky D.S., Dvoretzky S.I. Mathematical Modeling of Hydrogen Production Process by Pressure Swing Adsorption Method, *Advanced Materials and Technologies*, 2017, no. 2, pp. 38-49, doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.038-049

3. Ishin A.A. *Matematicheskoye modelirovaniye i upravleniye protsessom polucheniya vodoroda metodom adsorbtsionnogo razdeleniya gazovoy smesi* [Mathematical modeling and control of the hydrogen production process by the adsorptive separation method for gas mixtures], PhD Dissertation (Engineering), Tambov, 2017, 152 p. (In Russ.)

4. Akulinin, E., Ishin, A., Skvortsov, S. Modeling and Automation of Adsorption Processes with Cyclically Changing Pressure During the Separation of Gas Mixture, *17<sup>th</sup> International Multiisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2017*, Conference Proceedings, 2017, vol. 17, Energy and Clean Technologies, issue 41, pp. 527-534.

5. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. *Engineering Optimization: Methods and Applications*, New York: Wiley, 1983, 684 p.

6. Simonov M.S., Skvortsov S.A., Shlykov M.M. *Issledovaniye dinamicheskikh rejimov pnevmaticheskogo koncentratora kisloroda* [Study of dynamic modes of the pneumatic oxygen concentrator], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, issue 4, p. 987-990. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Vasilyev A.S., Lapina T.A., Skvortsov S.A. [The study of the modes of oxygen concentrators and their structural features], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, issue 4, p. 1007-1011. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Automatisierung des Prozesses der Adsorptionstrennung von Gasgemischungen und der Wasserstoffherzeugung**

**Zusammenfassung:** Es ist das Problem der Optimierung von Betriebsvariablen (Druck in der Adsorptionsstufe und Zeit des Adsorptionszyklus) formuliert und das 2-stufige System zur adaptiven Optimierung des Verfahrens der Adsorptionstrennung von Gasgemischen und Erzeugung von Wasserstoff höchster Reinheit in der 4-Adsorberanlage für kurzzyklische, nicht beheizte Adsorption mit körnigem Zeolith-Adsorptionsmittel CaA ist entwickelt.

Eine numerische Untersuchung der Effektivität der Funktionsweise des adaptiven Regelsystems mit einer schrittweisen Änderung der Störeffekte (Konzentration von Kohlendioxid, Temperatur und Druck des Gasgemisches) bei der Versorgung einer kurzzyklischen nicht erwärmten Adsorptionsanlage ist durchgeführt.

---

### **Automatisation du processus de la séparation d'adsorption des mélanges gazeux et de la production de l'hydrogène**

**Résumé:** Est formulée la tâche de l'optimisation des variables de régime (pression de la phase d'adsorption et temps du cycle de l'adsorption); est conçu un système à 2 niveaux de l'optimisation d'adaptation du processus de la séparation d'adsorption des mélanges gazeux et de l'obtention de l'hydrogène de la pureté maximale dans une installation de 4 adsorptions à cycle court sans chauffage avec un adsorbant granulé zéolithique CaA. Est effectuée une étude numérique de l'efficacité du fonctionnement du système de la commande adaptative lors de la modification étagée des effets perturbateurs (concentration en dioxyde de carbone, température et pression du mélange gazeux) dans l'alimentation de l'installation d'adsorption à cycle court sans chauffage.

---

**Авторы:** *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные процессы и управление», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Ишин Андрей Анатольевич* – кандидат технических наук, инженер-проектировщик, ООО «Энерготехпроект», г. Тамбов, Россия; *Скворцов Сергей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дворецкий Станислав Иванович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор, проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА БЕНЗИНОВЫХ ФРАКЦИЙ

**А. М. Джамбеков, И. А. Щербатов**

*Кафедра «Автоматика и управление»,  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,  
г. Астрахань, Россия; azamat-121@mail.ru*

**Ключевые слова:** гибридная модель; каталитический риформинг; классический ПИД-регулятор; нечеткий ПИД-регулятор; обобщенный критерий оптимальности; Парето-оптимальное решение; система оптимального управления.

**Аннотация:** Дана постановка задачи оптимального управления процессом каталитического риформинга, разработаны его гибридная математическая модель и методика оптимального управления данным процессом. Выполнен многокритериальный выбор системы регулирования температуры на выходе из печи. Синтезирован алгоритм определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса каталитического риформинга. Проведен поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом каталитического риформинга. Получены положительные эффекты при использовании разработанной системы оптимального управления процессом каталитического риформинга.

---

### Введение

Каталитический риформинг (КР) является важнейшим технологическим процессом современной нефтепереработки и нефтехимии. В течение последнего полувека процесс КР используется для получения высокооктанового бензина, ароматических углеводородов и водорода. Совершенствование процесса КР стимулируется постоянным введением новых требований к качеству моторных топлив и их химическому составу, в том числе и с учетом экологических соображений. Возрастающая с каждым годом актуальность совершенствования процесса КР определяется ростом потребности в высокооктановом моторном топливе. По состоянию на 2016 г. доля процессов риформинга в общем числе процессов нефтепереработки в Восточной Европе составляла 13,4 % [1].

Согласно содержанию генеральной схемы развития нефтеперерабатывающей промышленности России в перспективе до 2021 г. планируется ввести десять установок риформинга бензиновых фракций суммарной производительностью около 11 млн т/год, из них семь установок по технологии непрерывной регенерации катализатора [2].

В настоящее время мощности процесса КР в России составляют 9,3 % от суммарной мощности первичной переработки нефти. По данному показателю

Россия занимает второе место, уступая только США. Поскольку компонентный состав бензина содержит 54,1 % риформата, процесс КР на отечественных предприятиях нефтепереработки занимает ведущее место [3].

Вклад в исследование и развитие процесса КР внесли многие ученые, среди которых основатель научной школы «Интеллектуальные системы в химической технологии и профессиональном образовании» Э. Д. Иванчина. В существующих исследованиях решается задача повышения эффективности процесса КР путем разработки систем автоматического регулирования технологических параметров, а также систем оптимального управления по основным технико-экономическим показателям (доход, октановое число и пр.) [4].

Известно, что эффективность производства бензина зависит не только от повышения октанового числа выпускаемого топлива, но и снижения его себестоимости [4]. При этом, важной и до конца не решенной является научно-практическая задача построения системы управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат. На данный момент практически не существует исследований, направленных на разработку методов повышения эффективности процесса КР, обеспечивающих оптимальное соотношение производственных затрат и октанового числа бензина.

В настоящем исследовании предложено в качестве целевого функционала для оптимального управления процессом КР использовать обобщенный критерий оптимальности (ОКО), включающий показатели, характеризующие октановое число бензина и производственные затраты. Большие возможности для учета влияния данных показателей на эффективность процесса КР представляет построение гибридной математической модели (ММ) данного процесса [5]. Необходимо разработка системы оптимального управления процессом КР с использованием гибридной ММ. Для определения оптимальных соотношений частных критериев управления процессом КР, таких как октановое число бензина и производственные затраты, в данной работе предложено использование известного метода поиска Парето-оптимальных решений [6].

Таким образом, разработка системы оптимального управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных по Парето соотношений октанового числа бензина и производственных затрат, является актуальной научно-практической задачей.

### Постановка задачи

Целью исследования является повышение эффективности управления процессом КР путем разработки системы оптимального управления данным процессом, обеспечивающей достижение Парето-оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработка гибридной математической модели процесса КР.
2. Многокритериальный выбор автоматических систем регулирования технологических параметров процесса КР.
3. Синтез алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в различных режимах.
4. Разработка методики оптимального управления процессом КР.
5. Поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом КР.
6. Разработка системы оптимального управления процессом КР.

Проведенный анализ процесса КР как объекта управления (ОУ) позволил выделить для каждого типа переменных (входные  $X_{in}$  и выходные  $X_{out}$ , перемен-

ные состояния процесса  $A$ , управляющие  $U$  и возмущающие  $F$  воздействия) отдельные их группы, которые характеризуют октановое число бензина  $ON$  и производственные затраты  $Z$ .

Выполненный литературный обзор работ в области моделирования и управления процессом КР позволил сделать вывод о том, что преимуществом нечетких моделей процесса КР является использование неформализованной информации, без имеющейся или разработанной ММ в целях эффективного управления данным процессом. Отмечено, что отсутствует подход к управлению процессом КР, направленный на одновременное снижение производственных затрат и повышение качества бензина.

Выполнена постановка задачи оптимального управления процессом КР, отличающаяся использованием ОКО в качестве целевого функционала (1)

$$I = k_1 I_1 + k_2 I_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ k_1 ON_0 \frac{1}{ON(t)} + k_2 \frac{1}{Z_0} Z(t) \right] dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты, регулирующие относительную важность критериев  $I_1, I_2$  в отношении принятия Парето-оптимальных решений,  $k_1 + k_2 = 1$ ,  $0 < k_1 < 1$ ,  $0 < k_2 < 1$ ;  $I_1$  – критерий, обратный критерию максимизации среднего нормированного по величине  $ON_0$  значения октанового числа  $ON$  на интервале времени  $[0, T]$ ;  $I_2$  – критерий минимизации среднего нормированного по величине  $Z_0$  значения затрат  $Z$  на интервале времени  $[0, T]$ ;  $T$  – время работы установки КР, включающее межрегенерационные и межремонтные интервалы;  $ON_0$  – минимальное значение октанового числа  $ON$ ;  $Z_0$  – максимальное значение затрат  $Z$ .

В общем виде сформулирована задача оптимального управления процессом КР. При заданных входных переменных  $X_{in}$  найти управляющие воздействия  $U$ , обеспечивающие минимум ОКО (1) при наложенных связях в виде гибридной ММ процесса КР и ограничениях

$$ON \geq ON_0, \quad Z \leq Z_0, \quad U \in V, \quad A \in W, \quad (2)$$

где  $V$  – множество значений управляющих воздействий  $U$ ;  $W$  – множество значений переменных состояния процесса  $A$ .

### **Разработка гибридной математической модели процесса каталитического риформинга**

Разработана гибридная ММ процесса КР [7], которая в общем виде представлена как

$$X_{out} = F(X_{in}, A, U), \quad (3)$$

где  $X_{out}$  – вектор выходных переменных, включающий октановое число бензина  $ON$  и производственные затраты  $Z$ ;  $F$  – гибридная функция связи между переменными гибридной ММ процесса КР.

Научная новизна гибридной ММ процесса КР заключается в учете влияния параметров, характеризующих производственные затраты и октановое число бензина, на эффективность процесса и расчете значений обобщенного критерия оптимальности в зависимости от текущих значений входных переменных процесса.

В формуле (4) представлены основные выражения для описания гибридной функции  $F$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{out}}^i = \frac{(1 - K_{\text{lh}}^i) \left( (1 - |\alpha_i - 1,15|) \lambda_{\text{fg}} Q_{\text{fg}}^i + i_i Q_{\text{r}} \right)}{Q_{\text{r}} \text{CGM} \left( R_4 \circ QR^* \right)}, \quad i = \overline{1, 3}; \\ RP_j = 1 + x_1 + x_2 + x_3 + x_1 x_2 + x_1 x_3 + x_2 x_3 + x_1^2 + x_2^2 + x_3^2, \quad j = \overline{1, 3}; \\ ON = \text{CGM} \left( RP^* \circ R_5 \right) + 0,05 \left( MR_{\text{h/r}} \right)^{-3} + 49 - 14,47 Q_V - 9,8 P; \\ Z = Z_{\text{r}} + Z_{\text{e}} + Z_{\text{fg}} + Z_{\text{c}} + Z_{\text{rg}} + Z_{\text{pw}} + Z_{\text{dd}} + Z_{\text{ti,r}}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где  $QR^*$  – качество сырья;  $RP_j$  – четкая оценка жесткости процесса в  $j$ -м реакторе;  $RP^*$  – обобщенная жесткость процесса;  $Q_{\text{r}}$  – объемный расход сырья,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $MR_{\text{h/r}}$  – мольное соотношение водород/сырье, %;  $\lambda_{\text{fg}}$  – удельная теплота сгорания топливного газа,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $K_{\text{lh}}^i$  – коэффициент потерь тепла в  $i$ -й печи;  $i_i$  – энтальпия продуктовой смеси на входе в  $i$ -ю печь,  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ;  $T_{\text{out}}^i$  – температура на выходе из  $i$ -й печи,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_{\text{fg}}^i$  – объемный расход топливного газа в  $i$ -ю печь,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $\alpha_i$  – коэффициент избытка воздуха в  $i$ -й печи;  $Q_V$  – объемная скорость подачи сырья,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $P$  – давление в реакторах, МПа;  $Z_{\text{r}}$  – затраты на сырье, р.;  $Z_{\text{e}}$  – затраты на электроэнергию, р.;  $Z_{\text{fg}}$  – затраты на топливный газ, р.;  $Z_{\text{c}}$  – затраты на катализаторы, р.;  $Z_{\text{rg}}$  – затраты на реагенты, р.;  $Z_{\text{pw}}$  – затраты на заработную плату производственных рабочих, р.;  $Z_{\text{dd}}$  – амортизация на полное восстановление оборудования, р.;  $Z_{\text{ti,r}}$  – затраты на проведение планового ТО и ремонта оборудования, р.;  $Z$  – производственные затраты, р.;  $\text{CGM}$  – операция дефазификации нечетких множеств методом центра тяжести (*center of gravity method*);  $R_4(QR^*/HCM^*)$ ,  $R_5(RP^*/ON_0^*)$  – матрицы нечеткого отношения;  $ON_0^*$  – нечеткая оценка основного значения октанового числа  $ON_0$ ;  $HCM^*$  – теплоемкость продуктовой смеси (*heat capacity of mixture*), лингвистическая переменная;  $x_1 = T_{\text{out}}^i$ ;  $x_2$  – четкая оценка качества сырья  $QR^*$ ;  $x_3$  – четкая оценка активности катализатора  $AC^*$ .

На рисунке 1 представлены графики изменения нормированного критерия минимизации производственных затрат  $I_1(t)$ , нормированного критерия  $I_2(t)$ ,

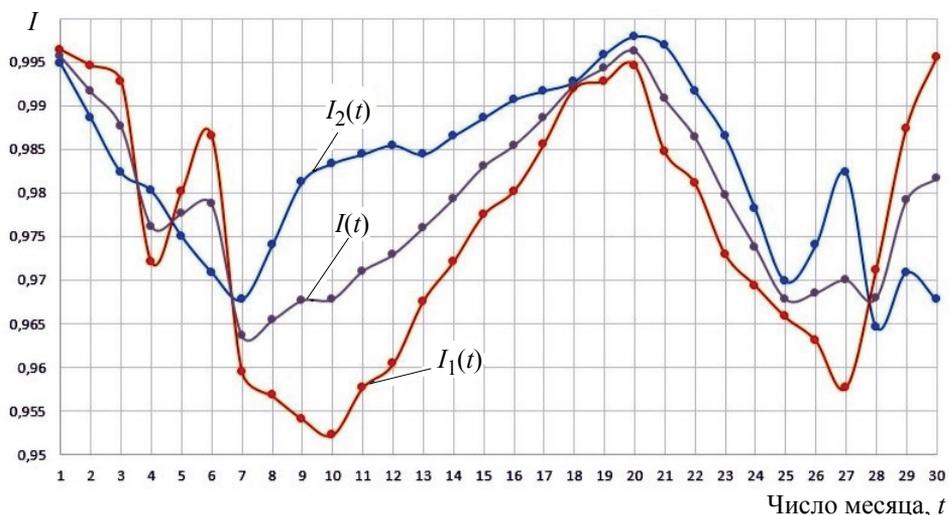


Рис. 1. Изменение нормированных критериев оптимальности процесса каталитического риформинга

обратного критерию максимизации октанового числа и ОКО  $I(t)$  соответственно. Согласно (1) определение ОКО  $I(t)$  по гибридной ММ (3) состоит в нахождении взвешенной суммы нормированных частных критериев  $I_1(t), I_2(t)$ .

Графики построены на основе гибридной ММ для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000, для которой определены максимальные годовые затраты 4,05 млрд р. и минимальное значение октанового числа бензина 92,83, в течение одного месяца [8].

Проверка адекватности гибридной ММ выполнена с использованием критерия Фишера. Выбор данного критерия связан с тем, что экспериментальная зависимость не имеет аномальных значений, число «опытов» равно числу значений экспериментальной кривой, поэтому нет необходимости в пересчете статистических характеристик данной выборки и использования критериев Кохрена и Стьюдента [7].

Расчетное значение критерия Фишера для выражения, определяющего затраты, равно 70,68, что превышает соответствующее табличное значение 2,69 при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и степенях свободы  $f_1 = 12, f_2 = 12$ ; для выражения, определяющего октановое число, значение данного критерия составило 15,48, что превышает соответствующее табличное значение 8,69 при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и степенях свободы  $f_1 = 16, f_2 = 3$ . Максимальная ошибка расчетов по гибридной ММ относительно результатов экспериментов не превышает 5 %.

### Многокритериальный выбор автоматических систем регулирования технологических параметров процесса каталитического риформинга

На основе метода нечетких парных сравнений разработаны математические выражения для многокритериального выбора автоматической системы регулирования (АСР) температуры на выходе из печи из пяти альтернатив по семи критериям [9]. Нечеткое решение  $\tilde{D}$  по схеме Беллмана–Заде определяется путем пересечения частных критериев

$$\tilde{D} = \bigcap_{i=1}^7 \tilde{k}_i = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_1)}{x_1}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_2)}{x_2}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_3)}{x_3}, \\ \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_4)}{x_4}, \frac{\min_{i=1,7} \mu_{k_i}(x_5)}{x_5} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

где  $\mu_{k_i}(x_j)$  – функция принадлежности (ФП) элемента  $k_i$  нечеткому множеству  $X$ ; «~» – обозначение нечеткой величины.

В результате расчета по выражениям получено, что наиболее полно соответствует всем критериям АСР с нечетким регулятором ПИД-типа МТ20-V-E FOTEK + PID Fuzzy, соответствующая максимальной ФП нечеткого решения, равной 0,954. Выполнена проверка адекватности данных выражений с использованием критерия Фишера.

Разработано программное обеспечение (ПО) для многокритериального выбора средств управления процессом КР на языке C#, которое позволяет выбрать наилучшую АСР температуры на выходе из печи риформинга из пяти альтернатив по семи критериям. С использованием ПО и базы данных выбрана АСР температуры на выходе из печи с нечетким регулятором ПИД-типа МТ20-R-E МТ-20E FOTEK + PID Fuzzy.

## Синтез алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в различных режимах

Процесс подогрева в печи риформинга рассмотрен в качестве ОУ. Определение настроек регулятора температуры на выходе из печи осуществляется при действии на ОУ возмущения – перепада температуры в печи  $\Delta T$  [10]. Научная новизна алгоритма заключается в количественном учете режимных параметров в передаточной функции возмущения и в определении настроек регулятора температуры на выходе из печи риформинга в зависимости от текущих режимных параметров. Представим пошаговое описание данного алгоритма.

*Шаг 1.* Задание соответствующих передаточных функций ОУ и действующих на ОУ возмущений  $P(s)$  и  $H(s)$ .

*Шаг 2.* Определение множества режимов процесса  $Y$  и задание режима  $y_0 \in Y$  при изменении параметров передаточной функции возмущения  $H(s)$ .

*Шаг 3.* При выборе классического ПИД-регулятора переход к шагу 4. Иначе, при выборе нечеткого ПИД-регулятора – к шагу 5.

*Шаг 4.* Определение множества настроек классического ПИД-регулятора  $R$  с помощью метода Циглера–Никольса для заданного режима  $y_0 \in Y$ .

*Шаг 5.* Определение множества настроек нечеткого ПИД-регулятора  $R$  с использованием методики расчета нечеткого регулятора для заданного режима  $y_0 \in Y$ .

*Шаг 6.* Исследование переходных процессов в АСР температуры на выходе из печи риформинга для заданного режима  $y_0 \in Y$ .

*Шаг 7.* Определение оптимальных настроек регулятора температуры  $R_{opt} \in R$  путем сравнительного анализа показателей качества переходных процессов.

Для определения настроек нечеткого ПИД-регулятора температуры на выходе из печи выполнено математическое описание ОУ и возмущения в виде передаточных функций, а также определены настройки ПИД-регулятора в системе MATLAB.

Для регулирования температуры на выходе из печи риформинга обычно применяют классические ПИД-регуляторы. При этом операторы процесса КР накапливают опыт, выраженный в виде «лингвистических правил управления» типа «Если ошибка регулирования мала, то управляющее воздействие большое». Большие возможности для обработки данных правил имеют методы теории нечетких множеств [11]. Исходя из опыта использования нечетких регуляторов на различных ОУ, возможна разработка нечеткого ПИД-регулятора на основе базы правил регулирования температуры на выходе из печи риформинга.

В результате сравнения качества переходных процессов в АСР с классическим и нечетким ПИД-регуляторами (рис. 2) получены положительные эффекты от использования нечеткого ПИД-регулятора: уменьшение перерегулирования в 10,4 раза и квадратичного интегрального критерия – в 4,3 раза.

На основе алгоритма определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса КР, реализованного в системе MATLAB, определены настройки нечеткого ПИД-регулятора МТ20-Р-Е МТ-20Е FOTEK + PID Fuzzy: ФП типа *gaussmf*; система нечеткого вывода Мамдани;  $P = 0,345$ ,  $I = 0,017$ ,  $D = 1,725$ , обеспечивающие достижение наилучших показателей качества переходного процесса: перерегулирования 0,005 °С и квадратичного интегрального критерия 1216.

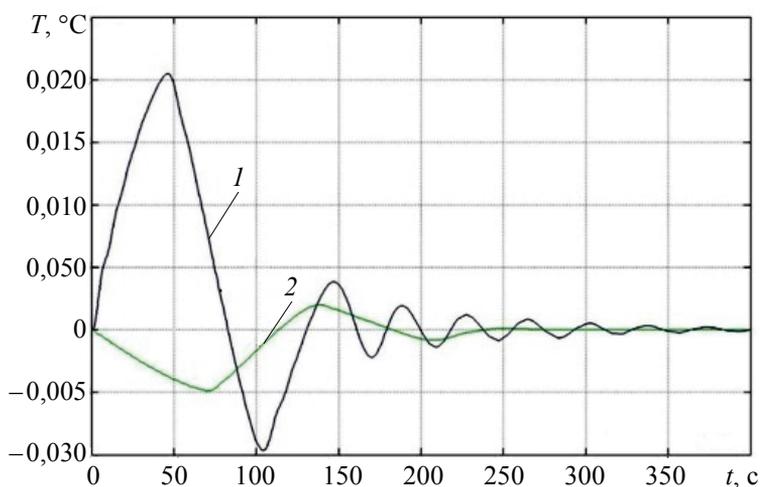


Рис. 2. Переходные процессы в АСР температуры на выходе из печи: 1, 2 – с классическим и нечетким ПИД-регуляторами соответственно

### Разработка методики оптимального управления процессом каталитического риформинга

Обосновано решение задачи оптимизации процесса КР с использованием метода равномерного поиска. Для этого рассмотрена зависимость ОКО  $I$  от двух переменных – температуры газосырьевой смеси на входе в печь  $T_{in}$  и температуры газосырьевой смеси на выходе из печи  $T_{out}$  [12].

Алгоритм оптимизации реализован в виде программного обеспечения (ПО) на языке C#. В результате расчета по алгоритму получены следующие оптимальные значения параметров процесса КР: температура на входе в печь  $T_{in}^{opt} = 180$  °С, температура на выходе из печи  $T_{out}^{opt} = 210$  °С, ОКО  $I_{opt} = 0,964$ .

На основе алгоритма оптимизации процесса КР разработана методика оптимального управления данным процессом. Научная новизна методики оптимального управления процессом КР заключается в учете экспертной информации при формализации нечетких целей и ограничений при управлении процессом и определении оптимальных управляющих воздействий по схеме Беллмана–Заде в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. Данная методика предназначена для оптимального управления процессом КР при нечеткой цели и нечетких ограничениях, которые задаются оператором в виде словесных высказываний (формулировок), и является расширением (дополнением) алгоритма оптимизации процесса КР на случай использования словесных формулировок при определении цели и ограничений на управление. Представим поэтапное описание данной методики.

**Этап 1.** Задание нечетких целей и ограничений в виде словесных высказываний (формулировок).

Нечеткой целью  $\tilde{G}$  в процедуре принятия решений при управлении процессом КР является выражение «ОКО должен быть минимальным». Одним из нечетких ограничений  $\tilde{C}_1$  является «активность катализатора должна быть выше средней», а другим  $\tilde{C}_2$  – «состояние печи риформинга должно быть лучше среднего».

Использование данных ограничений объясняется тем, что при повышении эффективности процесса КР необходимо поддержание удовлетворительных значений параметров катализатора и печи риформинга. Тем самым, ограничение  $\tilde{C}_1$

служит для увеличения межрегенерационного периода, а ограничение  $\tilde{C}_2$  предназначено для увеличения межремонтного периода [13].

**Этап 2.** Определение универсального множества альтернатив.

Значения альтернатив  $x$  множества  $X$  определяются величинами температуры на выходе из печи в диапазоне [100, 300] °С [14].

**Этап 3.** Формализация нечетких целей и ограничений в виде нечетких множеств на универсальном множестве альтернатив.

Нечеткая цель  $\tilde{G}$  и нечеткие ограничения  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$  представляют собой нечеткие множества на универсальном множестве  $X = \{x\}$  [15].

**Этап 4.** Определение нечеткого решения по схеме Беллмана–Заде в виде нечеткого множества на универсальном множестве альтернатив.

Нечеткое решение  $\tilde{D}$  при управлении процессом КР определяется по схеме Беллмана–Заде [15] как пересечение нечеткой цели  $\tilde{G}$  и нечетких ограничений  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$

$$\tilde{D} = \tilde{G} \cap \tilde{C}_1 \cap \tilde{C}_2. \quad (6)$$

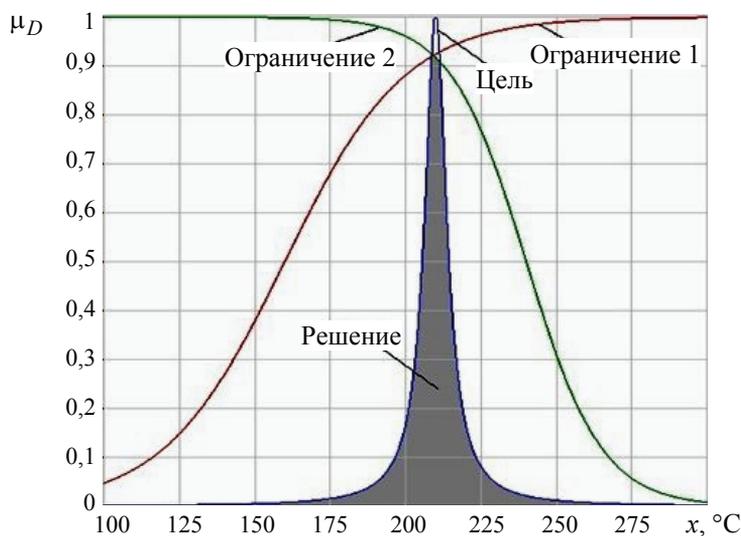
**Этап 5.** Определение альтернативы с максимальной ФП нечеткого решения.

Взаимосвязь между нечеткими целью  $\tilde{G}$ , ограничениями  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$  и решением  $\tilde{D}$  показана на рис. 3. На основе конфликта цели и ограничений при управлении процессом КР определяют альтернативу « $x$ » с максимальной ФП нечеткого множества  $\tilde{D}$ . Получаем область значений ФП  $\mu_D(x)$  «Решение», соответствующую множеству альтернатив для требуемых управляющих воздействий.

На основе (6) определена альтернатива  $x = 212$  °С, соответствующая максимальной ФП нечеткого решения. Следовательно, при температуре на выходе из печи  $x = 212$  °С достигается нечеткая цель  $\tilde{G}$ , сформулированная как «ОКО должен быть минимальным» при нечетких ограничениях  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ .

**Этап 6.** Определение управляющих воздействий с использованием полученной альтернативы на основе гибридной ММ процесса КР.

Используя гибридную ММ при заданных входных переменных, получаем оптимальные управляющие воздействия при  $x = 212$  °С для установки ЛЧ-35-11/1000.



**Рис. 3.** Принятие решения в системе оптимального управления процессом каталитического риформинга по схеме Беллмана–Заде

На основе методики определен вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО  $I = 0,964$ . Выделен вектор управлений  $U^z$ , влияющих на производственные затраты: расход сырья  $G_r - 1000$  т, расход электроэнергии  $G_e - 82$  МДж, расход топливного газа  $G_{fg} - 25$  м<sup>3</sup>, расход катализатора  $G_c - 0,02$  кг, расход реагента  $G_{rg} - 0,001$  кг. Также определен вектор управлений  $U^{on}$ , влияющих на октановое число бензина: производительность центробежного компрессора  $Q_{cc} - 2,1 \cdot 10^5$  м<sup>3</sup>/ч, объемный расход сырья  $Q_r - 130$  м<sup>3</sup>/час, количество сбрасываемого ВСГ  $Q_{hg} - 9 \cdot 10^4$  м<sup>3</sup>, объемный расход топливного газа в первую печь  $Q_{fg1} - 750$  м<sup>3</sup>/ч, объемный расход топливного газа во вторую печь  $Q_{fg2} - 850$  м<sup>3</sup>/ч, объемный расход топливного газа в третью печь  $Q_{fg3} - 950$  м<sup>3</sup>/ч.

Выполнена программная реализация методики оптимального управления процессом КР на языке С#, которая позволяет определять вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО. Для полученного вектора управлений определены показатели эффективности процесса КР: производственные затраты  $Z = 0,825$  млрд р.; октановое число бензина  $ON = 92,83$ ; ОКО  $I = 0,964$ .

### Поиск Парето-оптимальных решений при управлении процессом каталитического риформинга

Если по каким-либо причинам (ограниченность сырья, материалов и пр.) невозможна полная реализация управляющих воздействий (вектора управления), соответствующих минимуму ОКО, необходимо принятие Парето-оптимальных решений из возможных альтернатив [16]. Если для альтернативы  $x = 212$  °С, соответствующей минимуму ОКО, невозможна реализация вектора управлений, то необходимо определение вектора управлений для альтернатив из диапазона [205; 215] °С, при которых все равно ОКО минимален по отношению к двум другим локальным минимумам. Полученные вектора управлений для альтернатив из диапазона [205; 215] °С соответствуют значениям частных критериев  $I_1, I_2$ , на основе которых необходимо принятие решений при управлении процессом КР.

Использование нормированных значений критериев связано с возможностью их совмещения на одной критериальной плоскости и поиска Парето-оптимальных решений (рис. 4). Значения частных критериев и ОКО определяются с использованием гибридной ММ процесса КР [7].

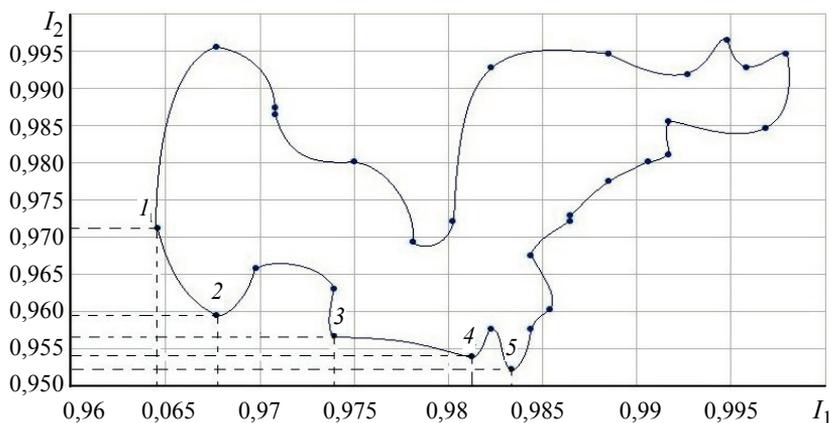


Рис. 4. Поиск оптимального решения на множестве Парето

Множество Парето (рис. 4) построено на основе методики оптимального управления процессом КР для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000 в течение одного месяца [8].

Исходя из рисунка 4, получено множество неулучшаемых решений Парето

$$\{I_1^1, I_2^1\}, \{I_1^2, I_2^2\}, \dots, \{I_1^i, I_2^i\}, \dots, \{I_1^5, I_2^5\}, \quad (7)$$

где  $\{I_1^i, I_2^i\}$ ,  $i = \overline{1,5}$  – значения частных критериев для  $i$ -го неулучшаемого решения.

Из (7) определено наилучшее решение (8), соответствующее минимуму ОКО,

$$\{I_1^1, I_2^1\}: I \rightarrow \min. \quad (8)$$

Оптимальное решение (8) соответствует значениям критериев:  $I_1 = 0,959$ ;  $I_2 = 0,967$ ;  $I = 0,964$  при весовых коэффициентах  $k_1 = k_2 = 0,5$ . Равенство весовых коэффициентов означает, что в общем случае при производстве бензина равный приоритет имеют задачи повышения октанового числа бензина и снижения производственных затрат. Так же, могут быть рассмотрены случаи принятия Парето-оптимальных решений, когда данное равенство не соблюдается.

### Разработка системы оптимального управления процессом каталитического риформинга

Разработана система оптимального управления процессом КР, структура которой представлена на рис. 5.

Объектом управления  $1$  является процесс КР, на который поступают входные переменные  $X_{in}$  и управляющие воздействия  $U$ . На выходе ОУ получают значения октанового числа продукта  $ON$  и производственных затрат  $Z$ .

Система оптимального управления  $2$  служит для управления процессом КР при нечеткой цели  $\tilde{G}$  и нечетких ограничениях  $\tilde{C}_1, \tilde{C}_2$ , задаваемых оператором  $3$

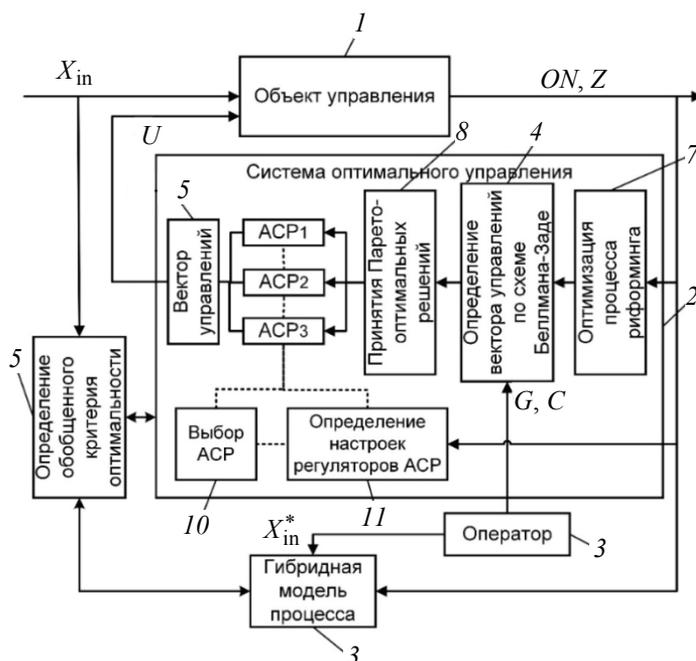


Рис. 5. Структура системы оптимального управления процессом КР

при реализации методики оптимального управления 4. Для определения ОКО 5 оператор 3 задает значения нечетких входных переменных  $X_{in}^*$  (активность катализатора, состояние печи риформинга и др.) на вход гибридной ММ процесса 6.

На основе алгоритма оптимизации процесса 7 при заданных четких ограничениях определяют альтернативу «х» – температуру на выходе из печи, при которой ОКО  $I(x)$  минимален. Полученная альтернатива «х» используется для задания нечеткой цели  $\tilde{G}$  «ОКО должен быть минимальным». На основе методики оптимального управления процессом 4 с использованием схемы Беллмана–Заде определяют альтернативу «х'», отличную от «х», при которой достигается минимум ОКО  $I(x)$ . Разница «х'–х» связана с неопределенностью информации, присутствующей в нечеткой цели и нечетких ограничениях, при которой происходит «смещение» на величину «х'–х» максимума ФП нечеткого решения  $\tilde{D}$ .

Для полученной альтернативы «х'» и для альтернатив из диапазона, при котором все равно ОКО минимален по отношению к двум другим локальным минимумам, с использованием процедуры поиска Парето-оптимального решения 8 и гибридной ММ 6 определяют вектор управлений  $U$  9, соответствующий минимуму ОКО.

На основе многокритериального выбора АСР 10 и алгоритма определения настроек регуляторов процесса КР в различных режимах 11 определяют наилучшую модель АСР и настройки регулятора для трех параметров процесса КР: температуры на выходе из печи риформинга (АСР<sub>1</sub>); давления в реакторе риформинга (АСР<sub>2</sub>); уровня в сепараторе риформинга (АСР<sub>3</sub>). Для определения исходной информации при выборе АСР разработана база данных средств управления процессом КР.

Получены положительные эффекты при использовании разработанной системы оптимального управления процессом КР: снижение средних затрат на 0,33 млн р.; повышение среднего октанового числа на 0,53; снижение среднего значения обобщенного критерия оптимальности на 0,025.

### Заключение

На основе современных методов оптимизации, вычислительной математики и теории управления получены новые научные результаты для теории и практики создания систем оптимального управления процессом КР.

1. Выполнена постановка задачи оптимального управления процессом КР, отличающаяся использованием ОКО в качестве целевого функционала, и позволяющая представить в общем виде гибридную ММ процесса КР в виде кортежа переменных, ограничения на данные переменные и связи между ними, а также требование к минимизации значения ОКО.

2. Разработана гибридная ММ процесса КР, отличающаяся учетом влияния параметров, характеризующих производственные затраты и октановое число бензина, на эффективность процесса, и позволяющая рассчитывать значения ОКО в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. На основе гибридной ММ для установки КР ЛЧ-35-11/1000 получены максимальные годовые затраты 4,05 млрд р. и минимальное октановое число бензина 92,83.

3. Синтезирован алгоритм определения настроек регулятора температуры на выходе из печи в различных режимах процесса КР, отличающийся количественным учетом режимных параметров в передаточной функции возмущения, и позволяющий определять настройки регулятора температуры на выходе из печи риформинга в зависимости от текущих режимных параметров. На основе алгоритма для заданного режима процесса КР определены настройки нечеткого регулятора ПИД-типа МТ20-R-E МТ-20Е FOTEK + PID Fuzzy, обеспечивающие достижение наилучших показателей переходного процесса: перерегулирования 0,005 °С и квадратичного интегрального критерия 1216.

4. Разработана методика оптимального управления процессом КР, отличающаяся учетом экспертной информации при формализации нечетких целей и ограничений при управлении процессом и позволяющая определять оптимальные управляющие воздействия по схеме Беллмана–Заде в зависимости от текущих значений входных переменных процесса. На основе методики определен вектор управлений, соответствующий минимуму ОКО  $I = 0,964$ .

5. На основе методики оптимального управления процессом КР построено множество Парето-оптимальных решений для типового набора входных переменных, характеризующих нормальное функционирование процесса на установке КР ЛЧ-35-11/1000 в течение одного месяца. На множестве Парето получено пять неулучшаемых решений в двухмерном критериальном пространстве, из которых выбрано наилучшее решение, соответствующее значениям критериев:  $I_1 = 0,959$ ;  $I_2 = 0,967$ ;  $I = 0,964$  при весовых коэффициентах  $k_1 = k_2 = 0,5$ .

6. Разработана структура системы оптимального управления процессом КР на основе разработанных моделей и алгоритмов: многокритериального выбора средств управления процессом КР; базы данных средств управления процессом КР; алгоритма определения настроек регуляторов процесса КР в различных режимах; алгоритма оптимизации процесса КР; методики оптимального управления процессом КР; принятия Парето-оптимальных решений.

7. Выполнена оценка повышения эффективности управления процессом КР. Сравнительный анализ существующей и разработанной системы управления процессом КР позволил определить положительные эффекты при использовании разработанной системы: снижение средних затрат на 0,33 млн р.; повышение среднего октанового числа на 0,53 пункта; снижение среднего значения ОКО на 0,025.

#### *Список литературы*

1. Имашев, У. Б. Особенности развития процесса каталитического риформинга в России / У. Б. Имашев, А. А. Тюрин, Е. А. Удалова // Башкир. хим. журн. – 2009. – Т. 16. – № 4. – С. 184 – 186.

2. Рахматуллин, А. Р. Получение автомобильных бензинов с пониженным содержанием ароматических компонентов / А. Р. Рахматуллин, А. Ф. Ахметов, Э. Р. Нурмухаметова // Нефтегазовое дело. – 2014. – № 12-2. – С. 106 – 112.

3. Роль процесса каталитического крекинга в производстве высокооктановых автомобильных бензинов / Р. А. Шарипов [и др.] // Соврем. проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 134.

4. Иванчина, Э. Д. Повышение технико-экономической эффективности каталитического риформинга с использованием компьютерной моделирующей системы / Э. Д. Иванчина, В. В. Дериглазов, И. К. Занин // Изв. Том. политехн. университета. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – Т. 319, № 3. – С. 105 – 109.

5. Проталинский, О. М. Проверка достоверности первичной информации в АСУ ТП с использованием нечетких множеств / О. М. Проталинский // Изв. высших учеб. заведений. Северо-Кавказ. регион. Сер. Техн. науки. – 2003. – № 3. – С. 60.

6. Литвинская, О. С. Формализация принятия решений на основе целевого функционала / О. С. Литвинская // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2012. – № 1 (5). – С. 74 – 79.

7. Джамбеков, А. М. Управление процессом каталитического риформинга на основе экспертной информации / А. М. Джамбеков // Новые материалы и технологии: состояние вопроса и перспективы развития : сб. материалов Всерос. молодеж. науч. конф. – 2014. – С. 382 – 387.

8. Власов, С. С. Моделирование процесса отбензинивания нефти при прогнозировании показателей качества бензина / С. С. Власов, А. Г. Шумихин // Вестн. Саратов. гос. техн. университета. – 2012. – Т. 1, № 1 (63). – С. 90 – 94.

9. Джамбеков, А. М. Многокритериальный выбор систем автоматического регулирования технологических параметров в условиях неопределенности / А. М. Джамбеков // Научные исследования и перспективные проекты – 2016 : сб. тр. I науч.-практ. конф. аспирантов, преподавателей, ученых. – 2016. – С. 95 – 105.

10. Джамбеков, А. М. Нечеткая система управления процессом каталитического риформинга / А. М. Джамбеков // Прикасп. журн. : управление и высокие технологии. – 2015. – № 4 (32). – С. 268 – 280.

11. Васильева, Н. В. Построение функций принадлежности параметров технологического процесса на основе нечеткой кластеризации производственных данных / Н. В. Васильева, Э. Д. Кадыров // Записки Горного института. – 2013. – Т. 202. – С. 251 – 253.

12. Воробович, Н. П. Применение теории оптимального управления для решения многокритериальной задачи сетевого планирования с нечеткими ограничениями по ресурсам / Н. П. Воробович // Вестн. Краснояр. гос. аграр. университета. – 2009. – № 8. – С. 15 – 18.

13. Шумихин, А. Г. Классификация технологических параметров процесса каталитического крекинга в нечеткой среде / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. университета. Хим. технология и биотехнология. – 2009. – Т. 10. – С. 121 – 127.

14. Джамбеков, А. М. Использование информационных технологий для обеспечения автоматизированного управления процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности / А. М. Джамбеков // Прикасп. журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2 (38). – С. 36 – 46.

15. Шумихин, А. Г. Формирование функций принадлежности для алгоритма нечеткого управления технологическим процессом каталитического крекинга / А. Г. Шумихин, И. А. Вялых // Изв. Том. политехн. университета. Инжиниринг георесурсов. – 2010. – Т. 316, № 5. – С. 132 – 136.

16. Романова, И. К. Применение аналитических методов к исследованию Парето-оптимальных систем управления / И. К. Романова // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2014. – № 4. – С. 238 – 266.

---

## Optimal Control of the Process of Catalytic Reforming of Petrol Fractions

A. M. Dzhambekov, I. A. Shcherbatov

*Department of Automation and Control, Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russia; azamat-121@mail.ru*

**Keywords:** catalytic reforming; classical PID controller; fuzzy PID controller; generalized optimality criterion; hybrid model; optimal control system; Pareto optimal solution.

**Abstract:** The problem of optimal control of the catalytic reforming process has been formulated. A hybrid mathematical model of the process of catalytic reforming has been developed. A multicriteria selection of the temperature control system at the outlet from the furnace is performed. The algorithm for determining the settings of the temperature regulator at the outlet from the furnace in various modes of the catalytic reforming process is synthesized. A method for the optimal control of the catalytic reforming process has been developed. The search of Pareto-optimal solutions for controlling the catalytic reforming process is carried out. Positive effects using the developed system of optimal control of the catalytic reforming process were obtained: a decrease in average costs by 0.33 million rubles; an increase in the average octane number by 0.53; a decrease in the average value of the generalized optimality criterion by 0.025.

## References

1. Imashev U.B., Tjurin A.A., Udalova E.A. [Peculiarities of the development of the catalytic reforming process in Russia], *Bashkirskij himicheskij zhurnal* [Bashkirsky chemical journal], 2009, vol. 16, no. 4, pp. 184-186. (In Russ.)
2. Rahmatullin A.R., Ahmetov A.F., Nurmuhametova Je.R. [Obtaining motor gasolines with a reduced content of aromatic components], *Neftegazovoe delo* [Oil and gas business], 2014, no. 12-2, pp. 106-112. (In Russ.)
3. Sharipov R.A., Sidorov G.M., Zinnatullin R.R., Dmitriev Ju.K. [The role of the catalytic cracking process in the production of high-octane gasolines], *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija* [Modern problems of science and education], 2015, no. 1-1, p. 134. (In Russ.)
4. Ivanchina Je.D., Deriglazov V.V., Zanin I.K. [Increase of technical and economic efficiency of catalytic reforming using computer modeling system], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources], 2011, vol. 319, no. 3, pp. 105-109. (In Russ.)
5. Protalinskij O.M. [Verification of the reliability of primary information in the process control system using fuzzy sets], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki* [News of Higher Educational Establishments. The North Caucasus region. Series: Engineering], 2003, no. 3, p. 60. (In Russ.)
6. Litvinskaja O.S. [Formalization of decision-making on the basis of the target functional], *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastojashhego plus* [XXI century: the results of the past and the problems of the present plus], 2012, no. 1 (5), pp. 74-79. (In Russ.)
7. Dzhambekov A.M. [Controlling the process of catalytic reforming on the basis of expert information], *Novye materialy i tehnologii: sostojanie voprosa i perspektivy razvitiya sbornik materialov Vserossijskoj molodezhnoj nauchnoj konferencii* [New materials and technologies: the state of the issue and prospects for development], Proceedings of the All-Russian Youth Scientific Conference, 2014, pp. 382-387. (In Russ.)
8. Vlasov S.S., Shumihin A.G. [Modeling the process of oil stripping while predicting the quality of gasoline], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2012, vol. 1, no. 1 (63), pp. 90-94. (In Russ.)
9. Dzhambekov A.M. [Multicriteria choice of automatic control systems for technological parameters in conditions of uncertainty], *Nauchnye issledovanija i perspektivnye proekty – 2016* [Scientific researches and perspective projects – 2016], Collection of works of I scientific-practical conference of post-graduate students, teachers, scientists, 2016, pp. 95-105. (In Russ.)
10. Dzhambekov A.M. [Fuzzy control system for the catalytic reforming process], *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2015, no. 4, pp. 268-280. (In Russ.)
11. Vasil'eva N.V. [Construction of the functions of the parameters of the technological process on the basis of fuzzy clustering of production data], *Zapiski Gornogo instituta* [Notes of the Mining Institute], 2013, vol. 202, pp. 251-253. (In Russ.)
12. Vorobovich N.P. [Application of the optimal control theory for solving the multicriteria network planning problem with fuzzy resource constraints], *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University], 2009, no. 8, pp. 15-18. (In Russ.)
13. Shumihin A.G., Vjalyh I.A. [Classification of technological parameters of the catalytic cracking process in a fuzzy medium], *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Himicheskaja tehnologija i biotehnologija* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2009, vol. 10, pp. 121-127. (In Russ.)

14. Dzhambekov A.M. [Use of information technologies to provide automated control of the catalytic reforming process under uncertainty], *Prikaspijskij zhurnal: upravlenie i vysokie tehnologii* [Pre-Caspian Journal: Management and High Technologies], 2017, no. 2(38), pp. 36-46. (In Russ.)

15. Shumihin A.G., Vjalyh I.A. [Formation of membership functions for the algorithm of fuzzy control of the technological process of catalytic cracking], *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [News of Tomsk Polytechnic University. Engineering georesources], 2010, vol. 316, no. 5, pp. 132-136. (In Russ.)

16. Romanova I.K. [Application of analytical methods to the study of Pareto - optimal control systems], *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.Je. Baumana* [Science and Education: a scientific publication of the Bauman Moscow State Technical University], 2014, no. 4, pp. 238-266. (In Russ.)

---

### **Optimale Prozesssteuerung des katalytischen Reformverfahrens der Benzinfraktionen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Aufgabenstellung der optimalen Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses erfüllt. Ein hybrides mathematisches Modell des katalytischen Reformierungsprozesses ist entwickelt. Eine multikriterielle Auswahl des Systems der Regulierung der Temperatur am Ausgang aus dem Ofen ist durchgeführt. Der Algorithmus zum Bestimmen der Einstellungen des Temperaturreglers am Ausgang aus dem Ofen in verschiedenen Modi des katalytischen Reformierungsprozesses ist synthetisiert. Die Methodik der optimalen Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses ist entwickelt. Die Suche nach Pareto-optimalen Lösungen der Steuerung des katalytischen Reformierungsprozesses ist durchgeführt. Positive Effekte sind mit dem entwickelten System der optimalen Kontrolle des katalytischen Reformierungsprozesses erzielt worden: die Senkung der durchschnittlichen Kosten um 0,33 Millionen Rubel; Erhöhung der durchschnittlichen Oktanzahl um 0,53; die Abnahme des Durchschnittswerts des verallgemeinerten Optimalitätskriteriums um 0,025.

---

### **Commande optimale du processus de reformage catalytique des fraction du pétrole**

**Résumé:** Est réalisée la mise du problème la commande optimale du processus de reformage catalytique. Est élaboré le modèle mathématique hybride du processus de reformage catalytique. Est réalisé le choix à multiples critères d'un système de la régulation de la température à la sortie du four. Est synthésé l'algorithme de la définitions des paramètres du régulateur de la température à la sortie du four dans de différent modes du processus de reformage catalytique. Est élaborée la méthodologie pour la commande optimale du processus de reformage catalytique. Est effectuée la recherche de Pareto-solutions optimales lors de la commande optimale du processus de reformage catalytique. Sont obtenus des résultats positifs lors de l'utilisation d'un système optimal de commande des processus de reformage catalytique: réduction du coût moyen de 0,33 millions de roubles; augmentation de la moyenne de l'indice d'octane à 0,53; diminution de la valeur moyenne d'une synthèse du critère d'optimalité à 0,025.

---

**Авторы:** *Джамбеков Азамат Матифулаевич* – аспирант кафедры «Автоматика и управление»; *Щербатов Иван Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматика и управление», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Россия.

**Рецензент:** *Попов Георгий Александрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационная безопасность», ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет», г. Астрахань, Россия.

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОСВЯЗНОЙ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СИНТЕЗА АММИАКА

В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев,  
А. В. Иванов, И. А. Козенко

*Кафедра «Информационные и управляющие системы»,  
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных  
технологий», г. Воронеж, Россия; kudryashovvs@mail.ru*

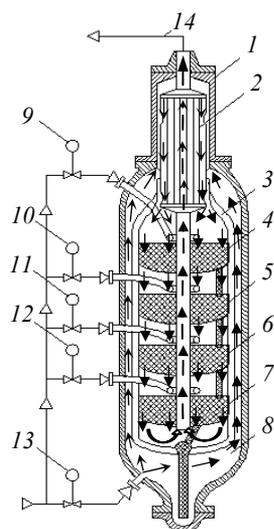
**Ключевые слова:** автономность; инвариантность; компенсатор; многомерность; цифровая многосвязная система управления.

**Аннотация:** Предложен метод расчета значений выходов автономных и инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов и многосвязных автономно-инвариантных цифровых систем управления, который позволяет осуществить синтез управляющей части и моделирование автономно-инвариантных цифровых систем регулирования. Путем моделирования многосвязной автономно-инвариантной цифровой системы синтеза аммиака доказана состоятельность и эффективность предложенного метода.

Во многих случаях объекты химической технологии представляют собой многомерную динамическую систему. Характерными примерами многомерных связанных объектов могут служить: технологические процессы разделения многокомпонентных смесей (ректификации, выпаривания, перегонки), процессы сушки различных веществ, реакционные процессы. Особенностями процесса каталитического синтеза аммиака [3] (рис. 1) является внутренняя нелинейная взаимосвязь между параметрами, наличие значительного числа возмущений и нестационарное поведение, обусловленное изменением активности катализатора с течением времени.

В локальных системах регулирования перечисленные особенности учитываются частично и, как следствие, не достигается требуемое качество управления – максимальное содержание аммиака на выходе реактора.

Повышение качества управления объектами с сильными внутренними связями при наличии возмущений возможно путем синтеза многосвязной системы на основе принципов автономно-инвариантного управления. Одним из важнейших этапов при этом является определение структуры взаимосвязей параметров и разработка модели объекта.



**Рис. 1. Четырехполочный реактор  
синтеза аммиака мощностью 1360 т/сут.:**

1 – корпус колонны; 2 – внутренний теплообменник; 3 – корпус катализаторной коробки; 4–7 – I–IV катализаторные слои соответственно; 8 – пространство между корпусом колонны и катализаторной коробки; 9–12 – клапаны подачи холодного газа на полки колонны; 13 – основной клапан подачи смеси по основному ходу колонны; 14 – выход колонны (смесь газообразного аммиака, водорода и азота)

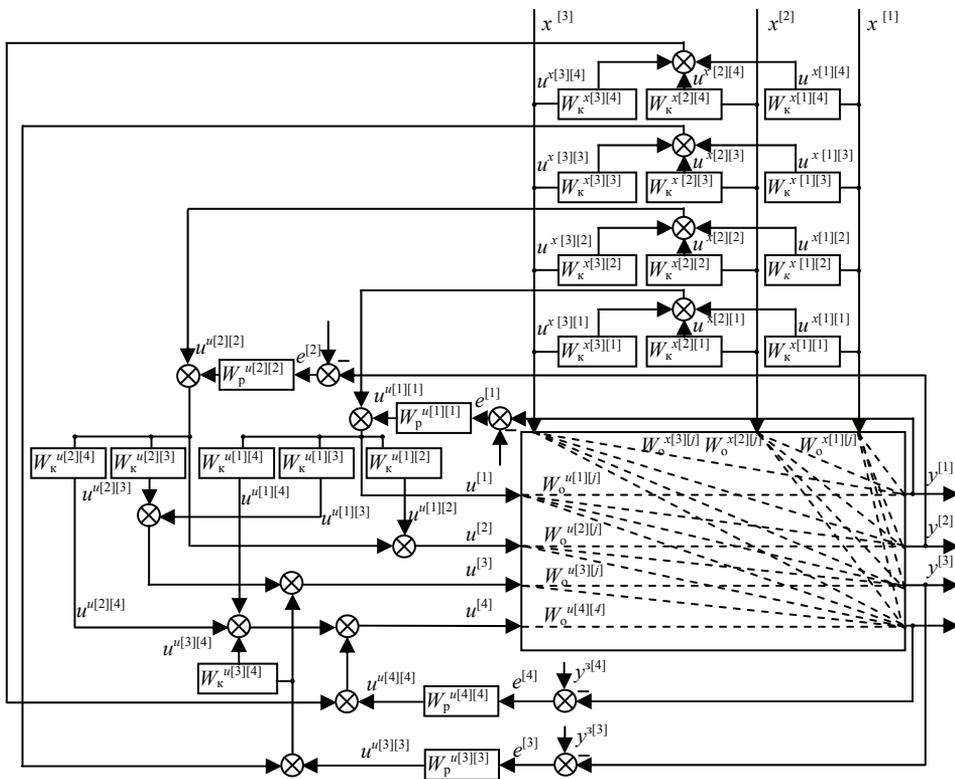


Рис. 2. Структурная схема многосвязной

**автономно-инвариантной цифровой системы управления:**

$W_o^{u^{[i][j]}}$ ,  $W_o^{x^{[i][j]}}$  – передаточные функции объекта по каналам управления и возмущения соответственно;  $W_k^{u^{[i][j]}}$ ,  $W_k^{x^{[i][j]}}$  – передаточные функции компенсаторов перекрестных связей ( $i \neq j$ ) и компенсаторов возмущений соответственно;  $W_p^{u^{[i][j]}}$  – передаточные функции регуляторов;  $y^{[i]}$  – суммарный измеряемый выход объекта управления;  $u^{[i][i]}$  – выход  $i$ -го основного регулятора;  $u^{[i][j]}$ ,  $u^{x^{[i][j]}}$  – выходы компенсатора перекрестной связи ( $i \neq j$ ) и компенсатора возмущения соответственно;  $x^{[i]}$  –  $i$ -е возмущающее воздействие;  $w = 3$  – количество возмущающих воздействий;  $y^{[3]}$  – задающее воздействие;  $e^{[i]}$  – сигнал рассогласования;  $u^{[i]}$  – суммарное управляющее воздействие;  $i, j = 1, r$ ;  $r = 4$  – размерность системы управления

Задачей управления процессом синтеза аммиака является поддержание температуры реакции в слоях катализатора при учете перекрестных связей и возмущений (концентрации инертного газа, аммиака и соотношения азот/водород на входе в реактор). Высокое качество управление такими объектами обеспечивается многосвязными системами, в частности автономно-инвариантными (рис. 2), учитывающими влияние перекрестных связей и внешних воздействий (полезных сигналов и возмущений).

Синтез и моделирование автономно-инвариантных цифровых систем управления (АВИИЦСУ) связан с расчетом автономных и инвариантных компенсаторов, а также эквивалентных объектов [1, 6], и требует выполнения следующих этапов.

1. Расчет структуры передаточных функций (ПФ) компенсаторов перекрестных связей из условия автономности

$$W_k^{u_{-авт}} = \left( W_o^{u_{-авт}} \right)^{-1} W_o^{uu_{-авт}}, \quad (1)$$

где  $W_{\kappa}^{u-авт}$  – вектор дискретных ПФ автономных компенсаторов;  $W_0^{u-авт}$  – блочная матрица, формируемая из дискретных ПФ основных и перекрестных каналов объекта;  $W_0^{uu-авт}$  – вектор, формируемый из дискретных ПФ перекрестных каналов объекта.

Из (1) следует [4], что дискретная ПФ автономного компенсатора в общем случае может быть описана дробно-рациональным выражением

$$W_{\kappa}^{u[i][j]}(z) = \frac{\sum_{\alpha, \beta=1}^{(r(r-1))!} \left( \prod_{\alpha, \beta=1}^{(r(r-1))} W_0^{u[\alpha][\beta]}(z) \right)}{\sum_{\alpha', \beta'=1}^{(r(r-1))!} \left( \prod_{\alpha', \beta'=1}^{(r(r-1))} W_0^{u[\alpha'][\beta']}(z) \right)}, \quad (2)$$

где  $W_0^{u[\alpha][\beta]}(z)$ ,  $W_0^{u[\alpha'][\beta']}(z)$  – ПФ каналов объекта;  $\alpha, \beta$  – номера слагаемого и сомножителя в числителе соответственно;  $\alpha', \beta'$  – номера слагаемого и сомножителя в знаменателе соответственно;  $z$  – оператор сдвига;  $i, j = \overline{1, r}$ ,  $i \neq j$ .

2. Получение полиномов числителя и знаменателя ПФ компенсаторов на основе аналитических преобразований.

3. Переход от ПФ к конечно-разностным уравнениям.

Аналогично осуществляется расчет ПФ эквивалентных объектов управления и инвариантных компенсаторов [5]:

$$W_0^{u экв[j][j]}(z) = W_{\kappa}^{u[i][j]}(z) + \sum_{l=1, l \neq j}^r \left( W_0^{u[l][j]}(z) W_{\kappa}^{u[j][l]}(z) \right); \quad (3)$$

$$W_{\kappa}^{x[i][j]}(z) = \frac{-W_0^{x[i][j]}(z)}{W_0^{u[i][j]}(z) + \sum_{l=1, l \neq j}^r \left( W_0^{u[l][j]}(z) W_{\kappa}^{u[j][l]}(z) \right)}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (4)$$

где  $W_0^{u экв[j][j]}(z)$ ,  $W_{\kappa}^{f[i][j]}(z)$  – ПФ эквивалентного объекта управления и инвариантного компенсатора соответственно.

Анализ зависимостей (1) – (4) расчета автономного и инвариантного компенсаторов, эквивалентного объекта показывает однотипность решаемых задач, связанных с аналитическими преобразованиями.

Таким образом, необходима разработка способа машинного моделирования АвИнЦСУ на основе универсальной методики автоматизированного расчета численного значения выхода динамического звена. При этом предложен способ синтеза структуры ПФ автономного компенсатора на основе обращения символьной матрицы [4].

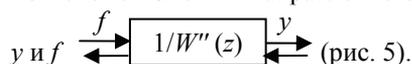
Особенностью предложенного алгоритма [2] расчета выхода динамического звена с ПФ, имеющей дробно-рациональную структуру (2), является декомпозиция, то есть в представлении звена (2) в виде последовательного соединения звеньев с ПФ числителя и ПФ знаменателя (рис. 3).

Расчет численного значения выхода сводится к последовательному расчету соединения звеньев  $W'(z)$  и  $1/W''(z)$ . Расчет выхода  $f$  заключается в последовательном расчете элементов цепочек и суммировании их выходов (рис. 4).



**Рис. 3. Схема звена с ПФ (2):**  
 $u$  – вход компенсатора;  $f$  – выход звена с ПФ  $W'(z)$ ;  $y$  – выход компенсатора

Для расчета выхода  $y$  по предложенной схеме изменим направление сигналов



$y$  и  $f$  (рис. 5).

В работе [2] получена формула расчета входа  $u$  на основании выхода  $f$ :

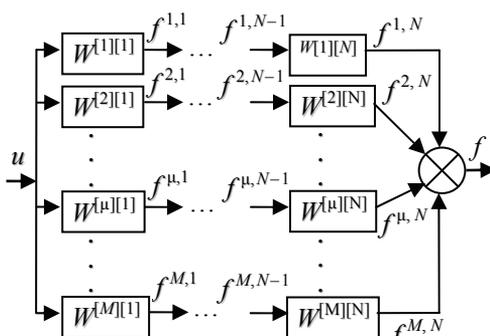
$$y_i = \left( \sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N} - \sum_{c=1}^{\rho} \left( \sum_{j=N}^2 \left( \sum_{t=1}^{n^{c,j}} a_t^{c,j} f_{i-t}^{c,j} + \sum_{t=1}^{k^{c,j}} b_t^{c,j} f_{i-t}^{c,j-1} \right) \prod_{q=N}^{j+1} b_1^{c,q} \right) + \right. \\ \left. + \left( \sum_{t=1}^{n^{c,1}} a_t^{c,1} f_{i-t}^{c,1} + \sum_{t=2}^{k^{c,1}} b_t^{c,1} f_{i-t+1}^{c,1} \right) \prod_{q=N}^2 b_1^{c,q} \right) / \sum_{c=1}^{\rho} \left( \prod_{q=N}^2 b_1^{c,q} \right); \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N} = f_i - \sum_{s=1}^l f_i^{s,N}, \quad (6)$$

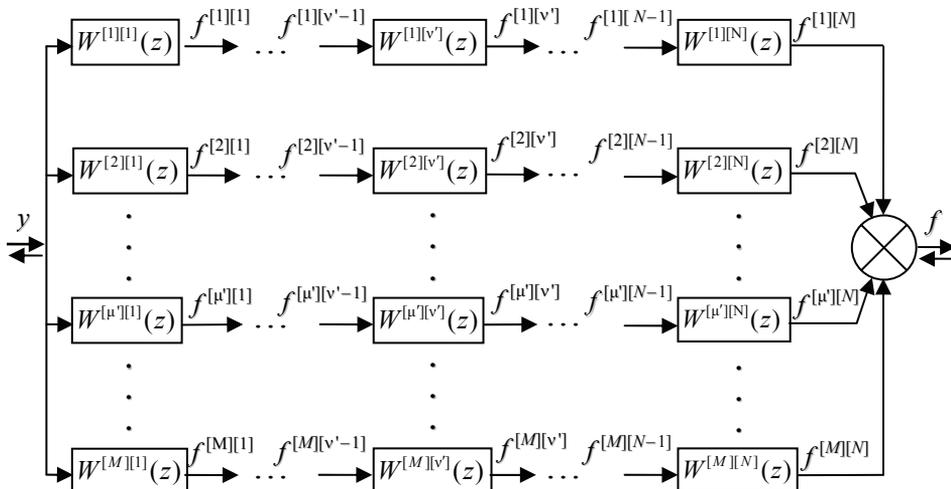
где  $\rho$  – число цепочек, суммарное запаздывание которых неравно нулю;  $a_t^{c,j}$ ,  $b_t^{c,j}$  – параметры моделей каналов объекта;  $\sum_{c=1}^{\rho} f_i^{c,N}$  – суммарный выход цепочек без запаздывания.

Таким образом, алгоритм расчета численного значения выхода звена, описываемого дискретной ПФ (2), можно представить схемой (рис. 6).

При расчете управляющей части автономной многосвязной системы необходима оптимизация основных регуляторов, синтез которых невозможен без расчета эквивалентных объектов. Расчет численного значения выхода  $u_{э\text{кв}}^{[j][j]}$  осуществляется путем последовательного расчета выходов всех  $r$  цепочек и их суммированием.



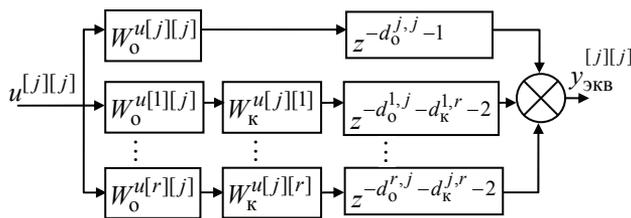
**Рис. 4. Структура схема декомпозиции числителя ПФ компенсатора (2):**  
 $W^{[M][N]}$  – ПФ каналов объекта;  
 $M, N$  – число цепочек соединения и элементов в каждой из них соответственно



**Рис. 5. Структура схема декомпозиции числителя ПФ компенсатора (2):**  
 $W^{[M'][N']}$  – ПФ каналов объекта;  $M', N'$  – число цепочек соединения и элементов в каждой из них соответственно



**Рис. 6. Схема алгоритма расчета численного значения выхода звена с ПФ (2)**



**Рис. 7. Структурная схема ПФ эквивалентного объекта (3):**  
 $u^{[j][j]}$ ,  $y_{\text{ЭКВ}}^{[j][j]}$  – выходы регулятора и эквивалентного объекта соответственно

При этом явный вид ПФ автономных компенсаторов, входящих в цепочки не используется, расчет ведется по схеме (см. рис. 3). Подобная организация звена с ПФ в виде дробно-рационального выражения и предложенный алгоритм позволяют рассчитать выход любого эквивалентного объекта с ПФ (3), и на его основе осуществить настройку основных регуляторов одним из известных методов оптимизации [5]. Помимо этого разработанный алгоритм может использоваться для адаптации основных регуляторов в системах управления, так как обеспечивает достаточное быстродействие по сравнению с алгоритмами, требующими получения результирующей ПФ эквивалентного объекта (рис. 7).

На базе математического и алгоритмического обеспечения разработано программное обеспечение (ПО) расчета и моделирования автономных цифровых систем управления (АвЦСУ) и АвИнЦСУ процессом синтеза аммиака.

Для описания каналов объекта (расход холодного газа на полки колонны – температура в соответствующих слоях катализатора) использовались дискретные модели второго порядка с запаздыванием [3]:

$$W_0^{u[i][j]}(z) = \frac{y^{u[i][j]}(z)}{u^{[i]}(z)} = \frac{b_0^{u[i][j]} z^{-1} - d_0^{u[i][j]}}{1 - a_1^{u[i][j]} z^{-1} - a_2^{u[i][j]} z^{-2}},$$

где  $a_k^{u[i][j]}$ ,  $b_0^{u[i][j]}$  – параметры дискретных моделей каналов объекта;  $d_0^{u[i][j]}$  – число тактов запаздывания;  $k = 1, 2$ .

В качестве регуляторов по основным каналам приняты цифровые регуляторы второго порядка:

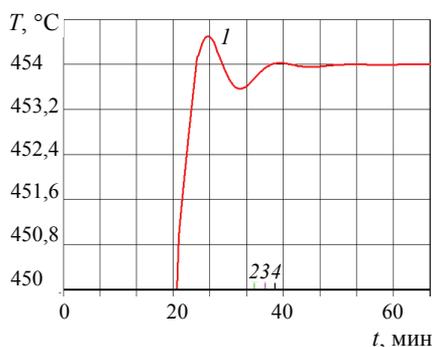
$$W_p^{u[j][j]}(z) = \frac{u^{u[j][j]}(z)}{e^{[j]}(z)} = \frac{q_0^{u[j][j]} + q_1^{u[j][j]}z^{-1} + q_2^{u[j][j]}z^{-2}}{1 - z^{-1}},$$

где  $q_m^{u[j][j]}$  – настроечные параметры цифрового регулятора;  $m = 0, 2$ .

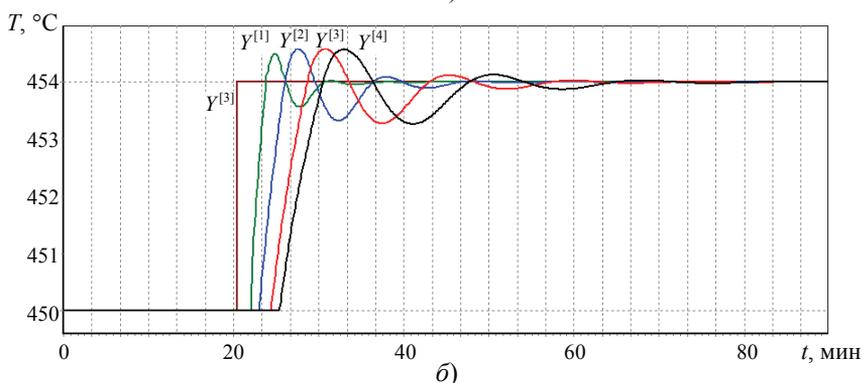
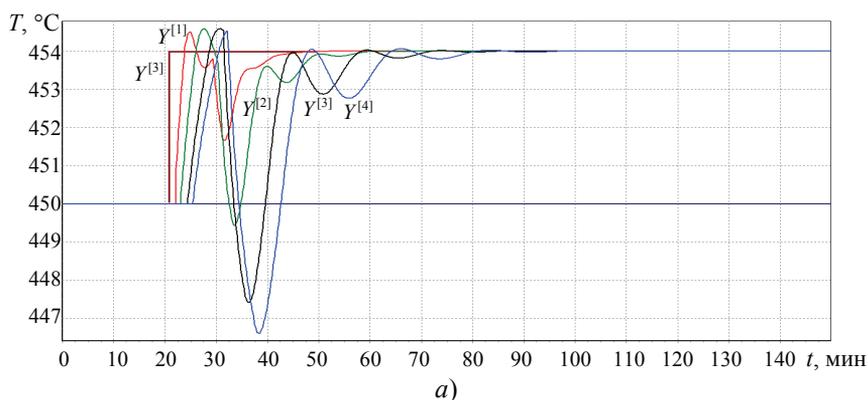
Проведена оптимизация настроек регуляторов градиентным методом по критерию минимума интегрально-квадратичной ошибки по ПФ эквивалентных объектов, и осуществлено моделирование АвЦСУ при подаче задания на первый канал.

Анализ динамических характеристик (рис. 8) доказывает эффективность предложенного метода, что подтверждается выполнением принципа автономности в полной мере (реализована полная компенсация влияния перекрестных связей на температуру во втором, третьем и четвертом слоях катализатора).

Динамические характеристики многосвязной АвИнЦСУ представлены на рис. 9.



**Рис. 8. Динамические характеристики процесса синтеза аммиака (по заданию только на первый канал):**  
1 – 4 – температура реакции  $T$  в соответствующих слоях катализатора



**Рис. 9. Динамические характеристики АвИнЦСУ синтеза аммиака при изменении заданий по температурам на всех слоях катализатора в условиях возмущений:**  
а – без инвариантных компенсаторов; б – с инвариантными компенсаторами возмущений;  
 $y^{[1]} - y^{[4]}$  – значения температуры в каждом слое

Таблица 1

**Сравнительные показатели качества управления АвИИЦСУ  
с компенсаторами возмущений и без них**

Условие	Суммарный выход	Интегрально-квадратичная ошибка	Время регулирования, мин	Перерегулирование, °С	Коэффициент затухания, %	Статистическая ошибка, °С
С инвариантными компенсаторами	$y^{[1]}$	125,317	26,33	0,496	10,27	0
	$y^{[2]}$	134,448	44	0,58	11,30	$7,2 \cdot 10^{-6}$
	$y^{[3]}$	145,07	51,33	0,58	10,13	$8,2 \cdot 10^{-4}$
	$y^{[4]}$	152,63	61,5	0,572	9,79	$0,1 \cdot 10^{-3}$
Без инвариантных компенсаторов	$y^{[1]}$	168,34	60	0,91	15,4	$2,2 \cdot 10^{-3}$
	$y^{[2]}$	601,40	117,5	1,56	12,98	$1,4 \cdot 10^{-2}$
	$y^{[3]}$	966,46	103,3	13,88	100	0,12
	$y^{[4]}$	1510,50	114	17,48	100	0,88

Наличие внешних возмущений может привести к значительному ухудшению показателей качества при использовании автономной системы, что подтверждается результатами моделирования (см. рис. 9, б).

Результаты машинного моделирования (см. рис. 9), а также расчетные значения показателей качества (табл. 1) позволяют сделать следующие выводы: совпадение графиков АвИИЦСУ при наличии возмущений и АвЦСУ без возмущающих факторов говорит о реализации принципа инвариантного управления.

Таким образом, предложенный метод и разработанный алгоритм позволяют моделировать многосвязные АвИИЦСУ путем расчета отдельных элементов системы (автономных и инвариантных компенсаторов, эквивалентных объектов) без получения их ПФ в явном виде, что значительно повышает эффективность синтеза таких систем за счет снижения временных затрат на аналитический вывод ПФ компенсаторов и эквивалентных объектов путем автоматизации вычислительных процедур.

*Список литературы*

1. Кудряшов, В. С. Алгоритм синтеза адаптивного многосвязного цифрового управления / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев // Автоматизация технол. процессов: управление, моделирование, контроль, диагностика. Прил. к журн. «Мехатроника, автоматизация, управление». – 2006. – № 7. – С. 2 – 7.
2. Кудряшов, В. С. Алгоритм расчета выходов автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев, И. А. Козенко // Вестн. ВГТА. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2010. – № 2. – С. 21 – 26.
3. Кудряшов, В. С. Моделирование и синтез цифровой многосвязной системы управления процессом получения аммиака / В. С. Кудряшов, С. В. Рязанцев, А. В. Иванов. – Воронеж : ВГТА, 2011. – 172 с.
4. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы управления / В. С. Кудряшов [и др.] // Вестн. ВГТА. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16 – 20.

5. Рязанцев, С. В. Разработка алгоритмов синтеза адаптивной цифровой системы управления многомерными объектами в условиях нестационарности : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 : защищена 24.12.2003 : утв. 04.04.2004 / Рязанцев Сергей Васильевич. – Воронеж, 2003. – 180 с.

6. Кудряшов, В.С. Синтез цифровых компенсаторов возмущений много-связных систем управления с использованием принципа инвариантности / В. С. Кудряшов, Н. Р. Бобровников, С. В. Рязанцев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 6. – С. 4 – 6.

---

## A Method of Simulation of a Multilift Digital System of Controlling the Process of Ammonia Synthesis

V. S. Kudryashov, S. G. Tikhomirov, S. V. Ryazantsev,  
A. V. Ivanov, I. A. Kozenko

*Department of Information and Control Systems,  
Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia;  
kudryashovvs@mail.ru*

**Keywords:** autonomy; digital multiply connected control system; compensator; invariance; multidimensionality.

**Abstract:** A method for calculating the values of the outputs of autonomous and invariant compensators, equivalent objects, and multiply connected autonomous invariant digital control systems is proposed. The method makes it possible to synthesize the control part and simulate autonomous invariant digital control systems. By modeling a multiply connected autonomous invariant digital ammonia synthesis system, the consistency and effectiveness of the proposed method has been verified.

### *References*

1. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V. [Algorithm for synthesis of adaptive multiply connected digital control], *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov: upravlenie, modelirovanie, kontrol', diagnostika. Prilozhenie k zhurnalu "Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie"* [Automation of technological processes: management, modeling, control, diagnostics. Supplement to the journal "Mechatronics, automation, control"], 2006, no. 7, pp. 2-7. (In Russ.)

2. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Kozenko I.A. [Algorithm for calculating the outputs of the autonomous compensators of a multiply connected digital control system], *Vestnik VGTA. Seriya: informatsionnye tekhnologii, modelirovanie i upravlenie* [Bulletin of the VSTA. Series Inform. technology, modeling and management], 2010, no. 2, pp. 21-26. (In Russ.)

3. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V. *Modelirovanie i sintez tsifrovoy mnogosvyaznoi sistemy upravleniya protsessom polucheniya ammiaka* [Modeling and synthesis of a digital multiply connected control system for the ammonia production process], Voronezh, VGTA, 2011, 172 p. (In Russ.)

4. Kudryashov V.S., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [A method for the automated synthesis of the structure of the transfer functions of autonomous compensators of a multiply connected digital control system], *Vestnik VGTA. Seriya: informatsionnye tekhnologii, modelirovanie i upravlenie* [Bulletin of the VSTA. Series Inform. technology, modeling and management], 2011, no. 2, pp. 16-20. (In Russ.)

5. Ryazantsev, S.V. *PhD Disertation (Engineering)*, Voronezh, 2003, 180 p. (In Russ.)

6. Kudryashov V.S., Bobrovnikov N.R., Ryazantsev S.V. [Synthesis of digital compensators of disturbances of multiply connected control systems using the invariance principle], *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2004, no. 6, pp. 4-6. (In Russ.)

---

### **Methode der Modellierung des mehrfach verbundenen Digitalsystems der Prozesssteuerung der Ammoniaksynthese**

**Zusammenfassung:** In der Arbeit ist eine Methode der Berechnung der Ausgangswerte der autonomen und invarianten Kompensatoren, der äquivalenten Objekte und mehrfach verbundenen autonomen invarianten digitalen Steuersysteme vorgeschlagen. Das Verfahren ermöglicht es, den Steuerteil zu synthetisieren und autonome invariante digitale Steuersysteme zu modellieren. Durch Modellierung eines mehrfach vernetzten autonomen invarianten digitalen Ammoniaksynthesystems ist die Lebensfähigkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Methode nachgewiesen.

---

### **La méthode de la simulation d'un système numérique à multiples connexions de la commande du processus de la synthèse de l'ammoniac**

**Résumé:** Est proposée une méthode de calcul des valeurs des sorties des compensateurs l'autonomes et invariables des systèmes numériques de la commande. La méthode permet d'effectuer la synthèse de l'unité de commande et la simulation de la partie de la commande des systèmes numériques de réglementation. Grâce à la modélisation d'un système numérique à multiples connexions de la commande du processus de la synthèse de l'ammoniac est prouvée la viabilité et l'efficacité de la méthode proposée.

---

**Авторы:** *Кудряшов Владимир Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Тихомиров Сергей Германович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Рязанцев Сергей Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Иванов Андрей Валентинович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и управляющие системы»; *Козенко Иван Александрович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Информационные и управляющие системы», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Россия.

**Рецензент:** *Хвостов Анатолий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор кафедры математики, ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

---

## СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ВРАЧА ПРИ ОЦЕНКЕ ПРЕДОПЕРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ БОЛЬНЫХ С ОСТРЫМИ НАРУШЕНИЯМИ МОЗГОВОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ

С. В. Синдеев, С. В. Фролов, А. Ю. Потлов

*Кафедра «Биомедицинская техника»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
ssindeev@yandex.ru*

**Ключевые слова:** аневризма; гемодинамика; математическое моделирование гидродинамики; модульная архитектура; церебральное кровообращение.

**Аннотация:** Предложена система поддержки принятия решений врача для оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения. Система построена на основе модульной архитектуры и может быть интегрирована в медицинские информационные системы. На основе модельного примера определено влияние неньютоновских свойств крови и нарушений общего кровообращения на кровоток в церебральной аневризме.

---

Оценка предоперационного состояния больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения является комплексной задачей, включающей, в том числе, и оценку кровотока в пораженной области, например в церебральной аневризме. Подобная задача осложнена еще и тем, что доступные клинические методы исследования кровотока, такие как компьютерная томографическая ангиография (КТ-ангиография) и доплер ультразвукового исследования (УЗИ), обладают сравнительно низким пространственным и временным разрешением и не могут быть использованы для точной оценки гемодинамических параметров в интересующей врача области.

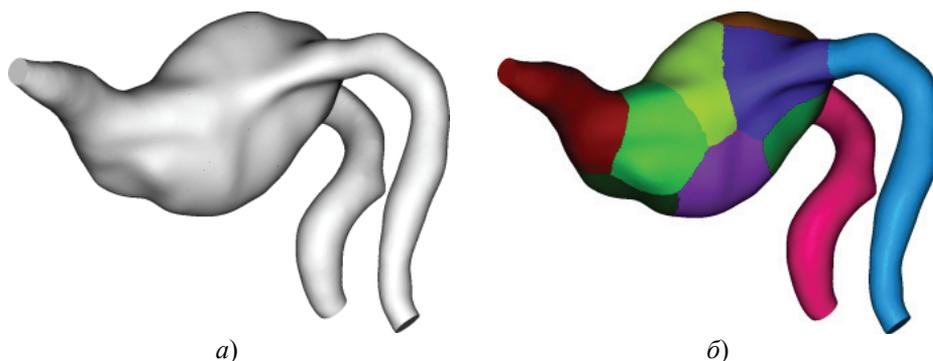
Одним из перспективных методов решения данной проблемы является оценка параметров кровотока в области церебральной артерии с помощью методов математического моделирования гемодинамики [1 – 3]. Геометрия церебральной артерии, параметры общего кровообращения и реологические свойства крови пациента определяются клиническими методами и учитываются в математической модели с помощью процедуры индивидуализации. Целью работы является разработка системы поддержки принятия решений (СППР) врача для оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями кровообращения на основе математического моделирования кровотока в церебральных артериях.

*Идентификация аневризмы и определение ее параметров с помощью клинических методов.* Для предварительной локализации церебральных аневризм предлагается использовать авторский алгоритм определения с помощью импульсной диффузионной оптической томографии (ДОТ) координат центров и эффективных радиусов для областей патологических отклонений в структуре биологической ткани, отличающийся формированием начального приближения к пространствен-

ным распределениям коэффициентов поглощения и рассеяния по индексу неоднородности, а также предположением о сферической форме и гомогенности по значениям параметров поглощения и рассеяния всех оптических неоднородностей в исследуемом биомедицинском объекте. Такой подход позволяет производить быстрые (менее 1 мин с учетом времени, необходимого на закрепление эластичного браслета с портами инъектирования и детектирования излучения на голове пациента), безопасные и относительно дешевые скрининговые обследования церебральных аневризм. Поскольку коэффициент поглощения крови для используемых в импульсной ДОТ длин волн зондирующего излучения 700...900 нм значительно выше  $\mu_a = 0,12...0,25 \text{ мм}^{-1}$  коэффициента поглощения тканей головы человека в целом  $\mu_a = 0,05...0,08 \text{ мм}^{-1}$ , наполненная кровью церебральная аневризма на их фоне будет представлять собой четко выраженную поглощающую неоднородность и вызывать существенное снижение интенсивности времени разрешенного сигнала на ближайших к этой неоднородности детекторах ДОТ-системы. Пространственное разрешение современных систем для импульсной ДОТ варьируется в диапазоне 2...4 мм, что значительно выше среднего размера церебральной аневризмы 4...15 мм.

Если в результате скринингового ДОТ исследования возникает подозрение о наличии аневризмы, то дополнительно проводятся исследования с помощью методов КТ-ангиографии и магнитно-резонансная томография (МРТ). Подобные исследования позволяют с высокой точностью определить наличие или отсутствие аневризмы церебральной артерии, но являются дорогостоящими и продолжительными по времени. В случае обнаружения аневризмы ее геометрия может быть определена с помощью сегментирования исходных DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) данных. Для определения кровотока в пораженной церебральной артерии может использоваться доплер УЗИ.

*Индивидуальная модель церебральной артерии с аневризмой.* Для проведения модельных исследований и оценки предоперационной гемодинамики использована индивидуальная геометрическая модель церебральной артерии пациента с аневризмой. Форма исследуемой церебральной артерии представлена на рис. 1, а. В области слияния позвоночных артерий наблюдается гигантская веретенообразная аневризма, расположенная вдоль базилярной артерии. Длина аневризмы составляет 35 мм, максимальный диаметр – 27 мм. Прогнозирование и оценка риска разрыва такой аневризмы только клиническими методами крайне затруднительна ввиду ее большого размера и сложной формы.



**Рис. 1. Базилярная артерия с веретенообразной аневризмой (а); пример разбиения геометрической модели церебральной артерии с аневризмой на расчетные подобласти (б)**

Помимо морфологических параметров врачу необходимо также оценить гемодинамические параметры в области аневризмы и в первую очередь гемодинамическую нагрузку на стенки церебральной артерии.

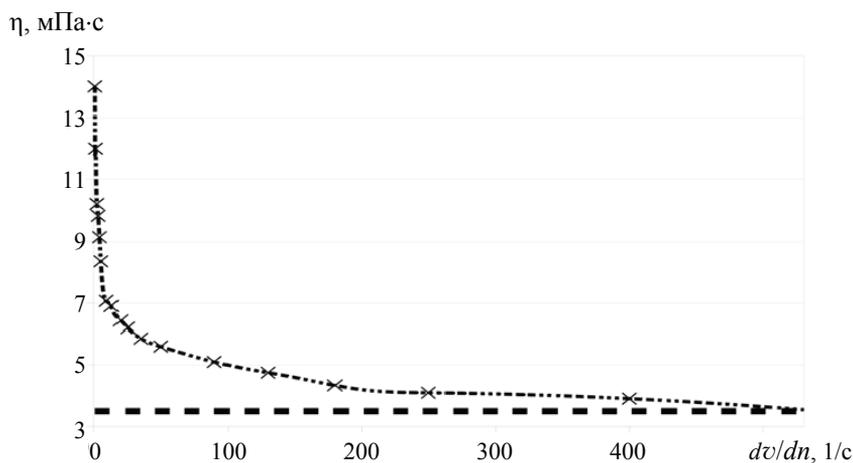
*Математическое моделирование гемодинамики церебральной артерии.* Для определения гемодинамических параметров в области церебральной аневризмы и гемодинамической нагрузки на стенки аневризмы в работе используется метод математического моделирования гемодинамики. За основу математической модели гемодинамики сердечно-сосудистой системы взята разработанная и протестированная ее многомасштабная модель [4, 5], включающая модели глобальной гемодинамики, гемодинамики артериального русла и локальной гемодинамики церебральной артерии. В отличие от исходной многомасштабной модели сердечно-сосудистой системы для учета индивидуальных реологических свойств крови пациента многомасштабная модель дополнена оригинальной моделью локальной вязкости, которая позволяет учесть индивидуальную зависимость вязкости крови пациента от степени сдвига.

Для ускорения расчета модифицированной модели гемодинамики был разработан и реализован алгоритм параллельного решения уравнений с помощью технологии высокопроизводительных вычислений MPI (Message Passing Interface). Алгоритм основан на разбиении исходной вычислительной области на относительно равные вычислительные подобласти, каждая из которых обрабатывается отдельным вычислительным процессом. Разбиение на подобласти зависит от наличия доступных вычислительных ресурсов и производится так, чтобы обмен данными между вычислительными процессами во время выполнения расчета был минимальным. Пример разбиения геометрической модели на подобласти представлен на рис. 1, б.

*Реологические свойства крови пациента.* Для учета индивидуальных особенностей конкретного пациента происходит индивидуализация математической модели сердечно-сосудистой системы с использованием индивидуальных реологических данных крови пациента. Имеется возможность представления крови на основе экспериментальных данных в виде ньютоновской (с постоянной вязкостью) или неньютоновской жидкости. Измерение реологических свойств крови пациента должно происходить при различных скоростях сдвига и может осуществляться, например, ротационным вискозиметром Haake RV/CV100 (Haake, Германия).

Для представления нелинейной зависимости между вязкостью крови и степенью сдвига могут использоваться как классические модели, например степенной закон вязкости, модель Кассона и др., так и предложенная авторами модель локальной вязкости. В отличие от классических моделей модель локальной вязкости основана на множестве кубических сплайнов, которые точно интерполируют полученную экспериментальную кривую измерений вязкости крови. В классических же моделях форма интерполирующей кривой задана заранее, что приводит к расхождению модельной и экспериментальной кривых в отдельных областях измерений, и далее к неточности определения гемодинамических характеристик в области церебральной аневризмы. Измеренная зависимость вязкости крови пациента от степени сдвига приведена на рис. 2. Как видно из рисунка неньютоновские свойства крови особенно сильно проявляются в областях скорости сдвига  $0 \dots 100 \text{ с}^{-1}$ , где кривая вязкости существенно возрастает.

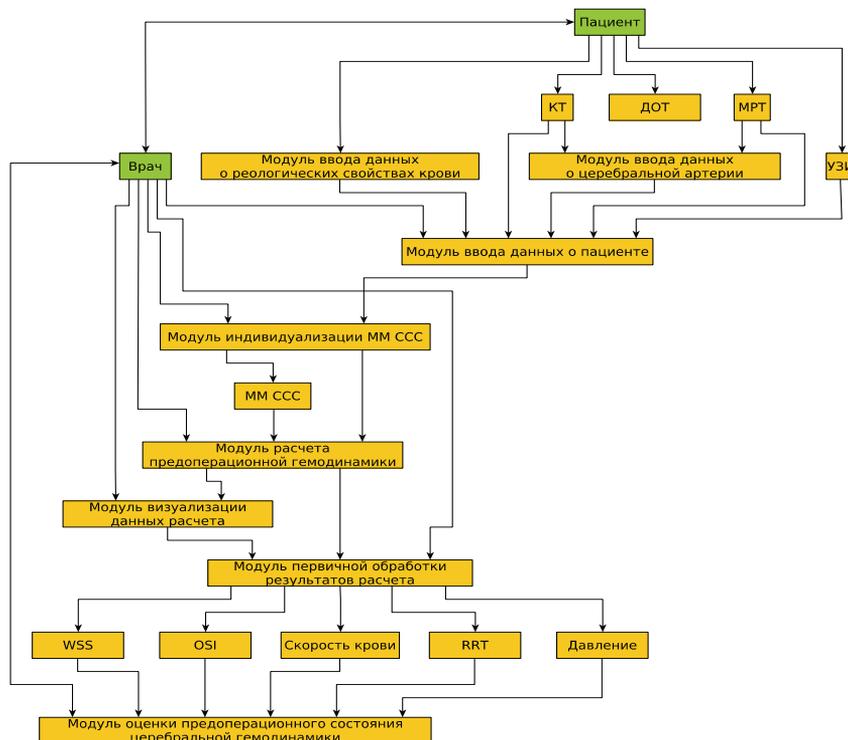
*Результаты.* Используя предложенные методы и подходы, разработана система поддержки принятия решений врача при оценке предоперационного состояния больных с острыми нарушениями кровообращения. Система построена на основе модульной архитектуры и включает в себя следующие модули: ввода данных о пациенте; ввода данных о церебральной артерии; ввода реологических свойств крови; индивидуализации математической модели сердечно-сосудистой системы



**Рис. 2. Экспериментальная зависимость вязкости крови пациента  $\eta$  от степени сдвига  $\nu$ :**

× кровь; — — — ньютоновская и ..... неньютоновская жидкости

пациента; расчета уравнений многомасштабной модели сердечно-сосудистой системы пациента; первичной обработки результатов расчета; визуализации данных расчета; оценки предоперационного состояния церебральной гемодинамики пациента. Схема разработанной системы поддержки принятия решений врача представлена на рис. 3.

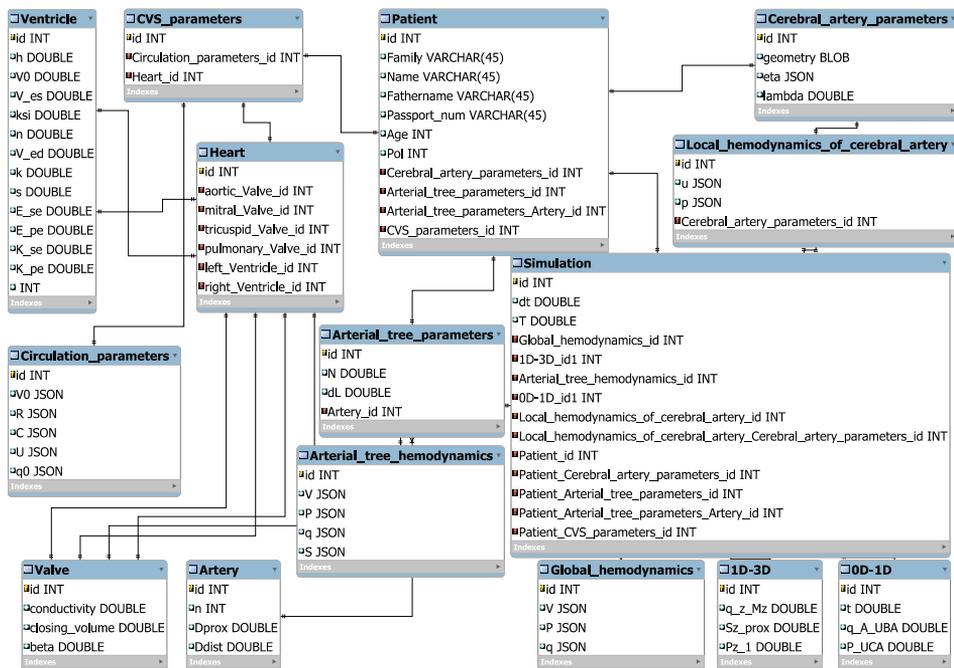


**Рис. 3. Схема системы поддержки принятия решений для оценки предоперационного состояния церебральной гемодинамики**

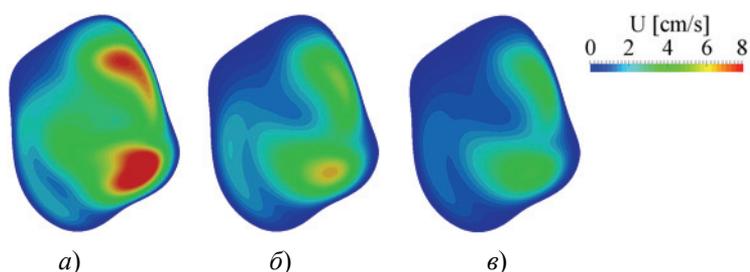
На основе количественных показателей, характеризующих церебральную гемодинамику пациента, врачом принимается решение о проведении необходимой лечебной процедуры для нормализации мозгового кровообращения пациента. Метод диффузионной оптической томографии планируется использовать в качестве дополнительного метода диагностики данных патологий. Группа пациентов проходит быстрые и относительно дешевые скрининговые обследования, у небольшого числа пациентов выявляются отклонения от нормы и они направляются на дополнительное обследование с помощью более точных методов медицинской визуализации. Затем по итогам серии диагностических исследований врач ставит конкретный диагноз.

На рисунке 4 представлена EER-модель (Enhanced Entity-Relationship) базы данных, используемой в разработанной СППР. Данная модель содержит следующие сущности: симуляцию (Simulation); пациента (Patient); параметры сердечно-сосудистой системы (CVS-Parameters); параметры сосудистой системы (Circulation\_parameters); сердце (Heart); желудочек (Ventricle); клапан (Valve); глобальную гемодинамику (Global\_hemodynamics); артерию (Artery); параметры артериального русла (Arterial\_tree\_parameters); гемодинамику артериального русла (Arterial\_treehemodynamics); 1D – 3D; параметры церебральной артерии (Cerebral\_arteryparameters); локальную гемодинамику церебральной артерии (Local\_hemodynamics\_of\_cerebralartery).

Разработанная СППР использована для анализа влияния неньютоновских свойств крови пациента и патологических факторов глобальной гемодинамики на распределение гемодинамических характеристик церебральной аневризмы. Основные анализируемые характеристики: распределение скорости крови, пристеночное напряжение сдвига (WSS – Wall Shear Stress), среднее значение WSS за сердечный цикл (AWSS – Average Wall Shear Stress), колебательный индекс сдвига (OSI – Oscillatory Shear Index), относительное время пребывания (RRT – Relative Residence Time).



**Рис. 4. Enhanced Entity-Relationship диаграмма базы данных (EER-диаграмма), используемой в СППР для оценки предоперационного состояния гемодинамики больных с церебральной аневризмой**



**Рис. 5. Распределение скорости крови в центральном сечении аневризмы при использовании ньютоновской (а), неньютоновской (б) жидкости и недостаточности митрального клапана (в)**

Геометрическая модель аневризмы получена на основе МРТ (см. рис. 1, а) Реологические свойства крови моделировались на основе результатов измерений (см. рис. 2). Патология общего кровообращения рассмотрена на примере недостаточности митрального клапана. Кривая входного кровотока определена с помощью доплер УЗИ.

В результате анализа выбранных гемодинамических характеристик обнаружено существенное влияние как неньютоновских свойств крови пациента, так и патологии глобальной гемодинамики на кровоток в церебральной аневризме. Пример распределения скорости крови в аневризме для различных вариантов моделирования приведен на рис. 5.

При использовании ньютоновской модели крови наблюдалась переоценка модуля скорости и производных характеристик (WSS, AWSS, OSI, RRT) по сравнению с неньютоновской моделью в среднем на 20...30 %. Влияние нарушений общей гемодинамики на кровоток в аневризме сравнительно меньше, порядка 10...15 %, ввиду наличия компенсаторных механизмов церебрального кровообращения. Разработанная СППР врача может применяться для многомасштабного моделирования сердечно-сосудистой системы для использования при индивидуальной оценке предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения.

*Заключение.* Использование предложенной системы поддержки принятия решений врача на основе моделирования кровотока в церебральных артериях будет способствовать повышению точности оценки предоперационного состояния гемодинамики пациентов с острыми нарушениями мозгового кровообращения и снижению риска возможных осложнений.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Тамбовской области в рамках научного проекта № 17-41-680932.*

#### *Список литературы*

1. Chung, B. Cfd for Evaluation and Treatment Planning of Aneurysms: Review of Proposed Clinical Uses and their Challenges / B. Chung, J. R. Cebral //Annals of Biomedical Engineering. – 2015. – Vol. 43, No. 1. – P. 122 – 138.
2. Синдеев С. В. Математическое моделирование гемодинамики в индивидуализированной модели церебральной аневризмы / С. В. Синдеев, С. В. Фролов, Я. Ш. Бауэр // Вестн. Там. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 424 – 428.
3. Математическое моделирование кровотока в области бифуркации базиллярной артерии / С. В. Фролов [и др.] // Вестн. Там. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 50 – 58.

4. Разработка модели многомасштабной гемодинамики для исследования основного кровообращения / С. В. Фролов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 4. – С. 46 – 53.

5. Синдеев, С. В. Моделирование гемодинамики сердечно-сосудистой системы при церебральной аневризме / С. В. Синдеев, С. В. Фролов // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 6. – С. 98 – 114.

---

## Decision-Making Support System for Doctors to Assess the Preoperative State of Patients with Acute Brain Circulation Disorders

S. V. Sindeev, S. V. Frolov, A. Yu. Potlov

*Department of Biomedical Engineering,  
TSTU, Tambov, Russia; sergej.frolov@gmail.com*

**Keywords:** aneurysm; hemodynamics; mathematical modeling of hydrodynamics; modular architecture; cerebral circulation.

**Abstract:** A clinical decision support system for assessing the preoperative hemodynamics of patients with acute cerebral disorders is proposed. The system is built on the basis of a modular architecture and can be integrated with medical information systems. Using a model example, the influence of the non-Newtonian blood properties and disorders of the general circulation on the blood flow in the cerebral aneurysm is evaluated.

### *References*

1. Chung B., Cebral J.R. CFD for Evaluation and Treatment Planning of Aneurysms: Review of Proposed Clinical Uses and their Challenges, *Annals of Biomedical Engineering*, 2015, vol. 43, no. 1, pp. 122-138.

2. Sindeev S.V., Frolov S.V., Bauer J.S. [Mathematical modeling of hemodynamics in patient-specific model of cerebral aneurysm], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 424-428. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Frolov S.V., Sindeev S.V., Liepsch D., Balasso A. [Mathematical modeling of blood flow in basilar artery bifurcation region], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 1, pp. 50-58. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Frolov S.V., Sindeev S.V., Lischouk V.A., Gazizova D.Sh., Liepsch D., Balasso A. [Development of multiscale hemodynamics model for research of basilar artery circulation], *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2013, no. 4, pp. 46-53. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Sindeev S.V., Frolov S.V. [Modeling the hemodynamics of the cardiovascular system in cerebral aneurysm], *Matematicheskoe modelirovanie* [Math modeling], 2016, vol. 28, no. 6, pp. 98-114. (In Russ.)

---

## System der Entscheidungsunterstützung des Arztes bei der Beurteilung des präoperativen Zustandes des Patienten mit akuten Störungen des Gehirnbloodkreislaufs

**Zusammenfassung:** Es ist ein System für Unterstützung der Entscheidungsfindung eines Arztes zur Beurteilung des präoperativen hämodynamischen Zustands des Patienten mit akuten Hirndurchblutungsstörungen

vorgeschlagen. Das System basiert auf einer modularen Architektur und kann in medizinische Informationssysteme integriert werden. Anhand eines Modellbeispiels ist der Einfluss von nicht-Newtonschen Bluteigenschaften und Verletzungen der allgemeinen Blutzirkulation auf den Blutfluss in dem zerebralen Aneurysma bestimmt.

---

### **Système du soutien des prises des décisions par un médecin lors de l'évaluation de l'état préopératoire des patients avec des troubles de la circulation cérébrale**

**Résumé:** Est proposé un système du soutien par un médecin lors de l'évaluation de l'état préopératoire de l'hémodynamique des patients avec des troubles de la circulation cérébrale. Le système est basé sur une architecture modulaire et peut être intégré dans les systèmes informatiques médicaux. A la base de l'exemple de modèle est définie de l'influence des propriétés néonewtoniennes du sang et des troubles de la circulation sanguine générale dans un anévrisme cérébral.

---

**Авторы:** *Синдеев Сергей Вячеславович* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Биомедицинская техника»; *Фролов Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника»; *Потлов Антон Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Биомедицинская техника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ БЛОКА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

**Т. И. Чернышова, Р. Ю. Курносов**

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
romankurnosov@rambler.ru*

**Ключевые слова:** аналого-цифровой преобразователь; измерительный канал; информационно-измерительная система; метрологическая надежность; метрологическая характеристика.

**Аннотация:** Предложена математическая модель изменения во времени метрологических характеристик электронных измерительных средств (ЭИС), позволяющая оперативно оценивать требуемые в конкретной постановке задачи прогнозирования показатели метрологической надежности. Приведена математическая модель для проектируемых блоков аналого-цифровых преобразований, входящих в структуру ЭИС.

---

Одной из важнейших характеристик качества измерительных средств (ИС), и в том числе информационно-измерительных систем (ИИС), является метрологическая надежность (МН), характеризующаяся способностью сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм при заданных режимах эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Основным показателем МН аналого-цифрового преобразования (АЦП) ИИС является метрологический ресурс (МР)  $t_p$ , определяемый временем пересечения реализаций нестационарного случайного процесса изменения во времени МХ границ поля допуска. Как показывают проведенные исследования [1] МН ИИС в целом определяется метрологической надежностью блоков, входящих в измерительный канал (ИК) ИИС: первичного измерительного преобразователя, нормирующих преобразователей, аналого-цифровых преобразователей. В современной структуре ИК ИИС особое место занимает блок АЦП, который отличается высокой точностью аналого-цифрового преобразования, сложностью и ответственностью выполняемых функций. Соответственно, достаточно важным является вопрос оценки показателей МН данного блока. В статье приводятся результаты оценки МР АЦП с использованием метода аналитико-вероятностного прогнозирования, в основе которого лежит процесс построения математической модели (ММ) функционирования блока и математических моделей его исследуемых характеристик. Следовательно, решение задачи оценки МН АЦП осуществляется с использованием принципов математического моделирования. На рисунке 1 представлена структурная схема АЦП двухтактного интегрирования, являющегося одним из типовых блоков в структуре современных ИСС.

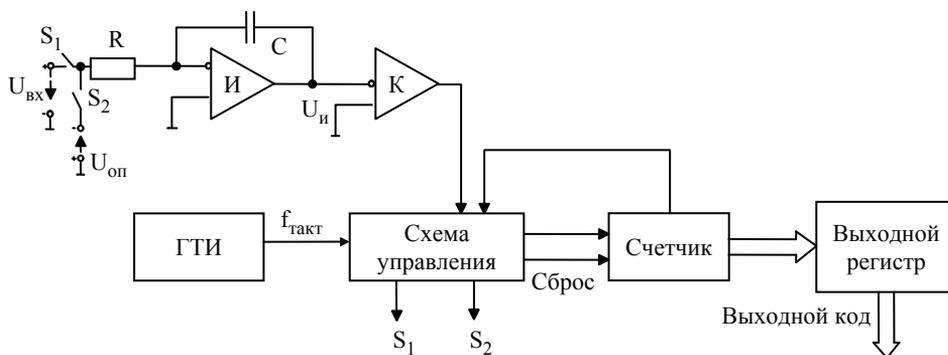


Рис. 1. Структурная схема АЦП двухтактного интегрирования

На начальном этапе решения поставленной задачи составляется ММ функционирования блока на основе анализа исходных структурной и функциональной схем [3, 4]. Преобразование сигнала проходит две стадии: стадию интегрирования и стадию счета. В начале первой стадии ключ  $S_1$  замкнут, ключ  $S_2$  разомкнут. Интегратор И интегрирует входное напряжение  $U_{вх}$ . После окончания стадии интегрирования ключ  $S_1$  размыкается, а ключ  $S_2$  замыкается и опорное напряжение  $U_{оп}$  поступает на вход интегратора, при этом выбирается опорное напряжение, противоположное по знаку входному напряжению. На стадии счета выходное напряжение интегратора линейно уменьшается по абсолютной величине. Стадия счета заканчивается, когда выходное напряжение интегратора переходит через нуль. При этом компаратор К переключается и счет останавливается. В блок АЦП двухтактного интегрирования входят модули: интегратор, компаратор, счетчик и выходной регистр. Функциональная схема АЦП представлена на рис. 2.

Анализ функциональной схемы показал, что наиболее ответственным в метрологическом отношении является модуль интегрирования (интегратор), структурная схема которого представлена на рис. 3.

Составим ММ функционирования интегратора. Так как сопротивление операционного усилителя велико, а его инвертирующий вход практически не потребляет ток, равенство запишем как

$$I_1 = I_2, \quad (1)$$

где  $I_1, I_2$  – токи, проходящие через резистор R и конденсатор C соответственно.



Рис. 2. Функциональная схема АЦП двухтактного интегрирования

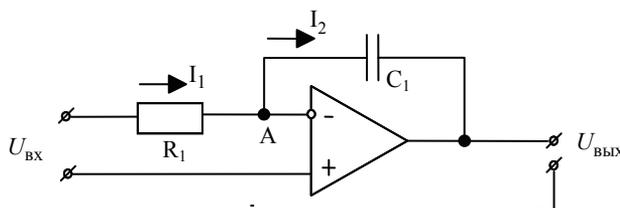


Рис. 3. Схема интегратора

Значения токов определяется выражениями:

$$I_1 = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R}; \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{C}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{ВХ}}$ ,  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $U_A$  – напряжения соответственно входное, выходное и действующее в точке  $A$ , определяемое по формуле

$$U_A = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}, \quad (4)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления операционного усилителя.

Подставляя формулы (2) и (3) в формулу (1), получим

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - U_A}{R} = \frac{U_A - U_{\text{ВЫХ}}}{C}. \quad (5)$$

Заменяя в (5)  $U_A$  в соответствии с (4), получим

$$\frac{U_{\text{ВХ}} - \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0}}{R} = \frac{\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_0} - U_{\text{ВЫХ}}}{C}, \quad (6)$$

Поделим обе части выражения (6) на  $U_{\text{ВХ}}$ , получим

$$1 - \frac{K_p}{K_0} = \frac{\frac{K_p}{K_0} - K_p}{C}, \quad (7)$$

где  $K_p$  – общий коэффициент передачи АЦП двухтактного интегрирования,

$$K_p = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}.$$

Таким образом, получим выражение для расчета коэффициента передачи инвертирующего усилителя

$$K_p = \frac{C}{\frac{C}{K_0} + \left(\frac{1}{K_0} - 1\right)R}. \quad (8)$$

Каскад на  $D_{A1}$  собран по схеме инвертирующего усилителя и входит в схему компенсации тока утечки  $C_1$

$$K_p = K_{DA1} = \frac{R_1}{\frac{R_1}{K_{0DA1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA1}} - 1\right)C_1}. \quad (9)$$

Математическая модель функционирования интегратора имеет вид

$$K_p(t) = \frac{R_1(t)}{\frac{R_1(t)}{K_{0DA1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA1}} - 1\right)C_1(t)}. \quad (10)$$

Следующим этапом реализации метода аналитико-вероятностного прогнозирования, применяемого при проектировании АЦП и анализе его МН, является построение ММ МР [2]. Из выражения (10) можно получить ММ метрологиче-

Результаты статистического моделирования

Время $t$ , ч	$m_{\delta} \cdot 10^2$	$\sigma_{\delta} \cdot 10^4$
0	2,7002	0,9986
500	2,6999	1,0829
1000	2,6999	1,5738
2000	2,6988	1,8698
5000	2,6976	2,0345

Таблица 1

ской характеристики блока – основной относительной погрешности  $\delta(t)$ , общая формула расчета которой представлена в виде

$$\delta(t) = \frac{K_{p.ном} - K_p(t)}{K_{p.ном}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где  $K_{p.ном}$  – номинальный коэффициент передачи модуля;  $t$  – время эксплуатации;  $|\delta(t)| < |\delta_{доп}|$ ,  $\forall t \in T_1$ ,  $\forall t \in T_2$  – условие метрологической исправности;  $T_1$  и  $T_2$  – области контроля и прогноза соответственно.

С учетом выражений (10) и (11) математическая модель основной относительной погрешности интегратора имеет вид

$$\begin{cases} \delta(t) = \frac{K_{p.ном} - K_p(t)}{K_{p.ном}}; \\ K_p(t) = \frac{R_1(t)}{\frac{R_1(t)}{K_{0DA_1}} + \left(\frac{1}{K_{0DA_1}} - 1\right) C_1(t)}. \end{cases} \quad (12)$$

С использованием статистического моделирования основной относительной погрешности строится ММ изменения во времени МХ проектируемого АБ электронных измерительных средств, представляющая совокупность аналитических зависимостей, полученных для функций временного изменения математического ожидания МХ  $M_{\delta}(t)$  и функций  $\Psi_{\pm\sigma}(t)$ , которые характеризуют изменение границ отклонения возможных значений исследуемой МХ от среднего значения с доверительной вероятностью  $P = 0,997$

$$\begin{cases} m_{\delta}(t); \\ \Psi_{\pm\sigma}(t) = m_{\delta}(t) \pm 3\sigma_{\delta}(t), \end{cases} \quad (13)$$

где  $\sigma_{\delta}(t)$  – среднеквадратическое отклонение МХ в различные моменты времени эксплуатации.

Результаты статистического моделирования основной относительной погрешности в заданные моменты времени контроля приведены в табл. 1.

Построенная по результатам статистического моделирования ММ изменения во времени основной относительной погрешности интегратора имеет вид:

$$\begin{aligned} \Psi_{-\sigma}(t) &= 4,239 \cdot 10^{-11} t^3 - 3,256 \cdot 10^{-9} t^2 + 2,851 \cdot 10^{-7} t + 1,932 \cdot 10^{-2}; \\ m_{\delta}(t) &= 8,234 \cdot 10^{-11} t^3 + 6,338 \cdot 10^{-9} t^2 + 3,792 \cdot 10^{-7} t + 2,437 \cdot 10^{-2}; \\ \Psi_{+\sigma}(t) &= 2,172 \cdot 10^{-11} t^3 - 6,625 \cdot 10^{-9} t^2 + 4,507 \cdot 10^{-7} t + 3,931 \cdot 10^{-2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Использование принципа экстраполяции модели (14) на область будущих значений времени эксплуатации рассматриваемого модуля в структуре АЦП позволяет с доверительной вероятностью  $P = 0,997$  определить величину его МР исследуемого модуля  $t_p = 41400$  ч. Полученное значение выбранного показателя МН может рассматриваться как верхняя граница вероятностной оценки МР блока АЦП в целом. Таким образом, использование метода аналитико-вероятностного

прогнозирования с применением математического моделирования МХ исследуемых измерительных средств позволяет оценить показатели их МН уже на начальных этапах проектирования.

#### *Список литературы*

1. Мищенко, С. В. Метрологическая надежность измерительных средств / С. В. Мищенко, Э. И. Цветков, Т. И. Чернышова. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 96 с.
2. Цветков, Э. И. Метрология. Модели объектов, процедур и средств измерений. Метрологический анализ. Метрологический синтез / Э. И. Цветков. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 293 с.
3. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств / Т. И. Чернышова, М. А. Каменская, Р. Ю. Курносов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 2. – С. 209 – 215. doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215
4. Чернышова, Т. И. Применение математического моделирования при реализации методов оценки и повышения метрологического ресурса аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 381 – 387. doi: 10.17277/ vestnik.2015.03.pp.381-387

---

## **Application of Mathematical Modeling Methods in the Assessment of Metrological Reliability of Analog-to-Digital Converter Unit**

**T. I. Chernyshova, R. Yu. Kurnosov**

*Department of Designing of Radio-Electronic and Microprocessor Systems,  
TSTU, Tambov, Russia; romankurnosov@rambler.ru*

**Keywords:** analog-to-digital converter; measuring channel; metrological reliability and metrological characteristics of information-measuring system.

**Abstract:** The mathematical model of metrological characteristics of electronic measuring instruments (EMS) changing in time is proposed. The model is used for quick assessment of the required metrological reliability indicators for the specific problem. The mathematical model for the designed analog-to-digital converter units within the EMS structure is given.

#### *References*

1. Mishchenko S.V., Tsvetkov E.I., Chernyshova T.I. *Metrologicheskaya nadezhnost' izmeritel'nykh sredstv* [Metrological reliability of measuring equipment], Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 96 p. (In Russ.)
2. Tsvetkov E.I. *Metrologiya. Modeli ob"ektov, protsedur i sredstv izmerenii. Metrologicheskii analiz. Metrologicheskii sintez* [Metrology. Models of objects, procedures and measuring instruments. Metrological analysis. Metrological synthesis], St. Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI", 2014, 293 p. (In Russ.)

3. Chernyshova T.I., Kamenskaya M.A., Kurnosov R.Yu. [Mathematical Modeling of the Metrological Characteristics in Assessment of Electronic Metrological Reliability of Electronic Measuring Equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 2, pp. 209-215, doi: 10.17277/vestnik.2017.02.pp.209-215 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Chernyshova T.I., Tret'yakov V.V. [Application of Mathematical Modeling for Evaluation Methods and Improvement of Metrological Resource of Analog Units of Data-Measuring Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-387, doi: 10.17277/vestnik.2015.03.pp.381-387 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Anwendung der Methoden der mathematischen Modellierung bei der Bewertung der metrologischen Zuverlässigkeit des Analog-Digital-Umsetzers**

**Zusammenfassung:** Es ist ein mathematisches Modell der Änderung der messtechnischen Eigenschaften elektronischer Messmittel (EMM) im zeitlichen Verlauf vorgeschlagen, das ermöglicht, die für eine bestimmte Aussage des Vorhersageproblems erforderlichen messtechnischen metrologischen Zuverlässigkeitsparameter schnell einzuschätzen. Ein mathematisches Modell für die projizierten Blöcke der analog-digitalen Transformationen, die ein Teil der EMM-Struktur sind, ist angegeben.

---

### **Application des méthodes de la modélisation mathématique lors de l'évaluation métrologique de la fiabilité du bloc du convertisseur analogique-numérique**

**Résumé:** Est proposé un modèle mathématique de la variation dans le temps des caractéristiques métrologiques des moyens de mesure électroniques (MME) permettant d'évaluer rapidement des tâches requises, en particulier, de la fiabilité de la prévision des indicateurs métrologiques. Est cité un modèle mathématique pour les blocs conçus des convertisseurs analogiques et numériques inclus dans la structure de MME.

---

**Авторы:** *Чернышова Татьяна Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», директор института энергетики, приборостроения и радиоэлектроники; *Курносков Роман Юрьевич* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Шамкин Валерий Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ТРЕТИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ

Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин, А. И. Рогачёв

*Кафедра «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
resbn@jesby.tstu.ru*

**Ключевые слова:** воздушные суда; информационно-измерительные системы; модель; третичная обработка информации; угломерный канал.

**Аннотация:** Разработан метод функционирования угломерного канала информационно-измерительной системы с учетом использования весовых коэффициентов в третичной обработке информации. Обоснован выбор моделей состояния и наблюдения, разработан алгоритм третичной обработки информации.

---

### Введение

В современных автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) происходят процессы, необходимые для обеспечения безопасности воздушного движения. Начало процессов заключается в получении исчерпывающей и непрерывно обновляемой информации о координатах и характеристиках воздушной цели (ВЦ). Данную информацию в АС УВД получают с помощью средств, входящих в подсистему сбора и обработки радиолокационной информации (РЛИ), а именно: постов и центров обработки РЛИ, авиационных комплексов радиолокационного обзора и наведения [1, 2]. В зависимости от конструкции АС УВД в ней могут проводиться: первичная, вторичная и третичная обработки информации.

В настоящее время разработаны различные методы третичной обработки информации (ТОИ):

- с равным весом поступающей информации;
- статическими весовыми коэффициентами, характеризующими эффективность и точность постов и центров получения РЛИ;
- динамическими весовыми коэффициентами, характеризующими эффективность обнаружения ВЦ.

**Цель работы.** Синтез алгоритма функционирования угломерного канала информационно-измерительных системы использующую третичную обработку информации с учетом динамических весовых коэффициентов движения воздушных судов.

Третичная обработка информации представляет собой несколько последовательных операций над РЛИ. Началом ТОИ служит сбор информации о ВЦ. Далее синхронизация полученных данных для успешного решения вопроса о количестве целей, затем происходит усреднение информации об отметке от ВЦ.

Математически данный этап представлен формулой [1, 3]

$$\varphi_{\text{ТОИ}} = \frac{b_1 \varphi_1 + b_2 \varphi_2}{b_1 + b_2}, \quad (1)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – весовые коэффициенты среднеквадратичного отклонения (СКО) измерителей РЛС1 и РЛС2 соответственно;  $\varphi_1, \varphi_2$  – азимуты угломерных каналов РЛС1 и РЛС2 соответственно.

Весовые коэффициенты можно вычислить по формулам:

$$b_1 = \frac{1}{\Delta\varphi_1^2}; \quad b_2 = \frac{1}{\Delta\varphi_2^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_1$  и  $\Delta\varphi_2$  – невязки азимутов угломерных каналов РЛС1 и РЛС2.

Алгоритм ТОИ начинает свою работу после того, как все фазовые координаты (азимут, угловая скорость и ускорение) будут приведены к единой системе координат [4, 5]. От двух РЛС в центре АС УВД поступает два вектора состояния ВЦ и два вектора оценки невязки после вторичной обработки информации калмановским фильтром на РЛС:

$$X_{\text{РЛС1}}(k) = [\varphi_1(k) \quad \omega_1(k) \quad a_1(k)]^T; \quad (3)$$

$$X_{\text{РЛС2}}(k) = [\varphi_2(k) \quad \omega_2(k) \quad a_2(k)]^T; \quad (4)$$

$$Y_{\text{РЛС1}}(k) = [\Delta\varphi_1(k) \quad \Delta\omega_1(k) \quad \Delta a_1(k)]^T; \quad (5)$$

$$Y_{\text{РЛС2}}(k) = [\Delta\varphi_2(k) \quad \Delta\omega_2(k) \quad \Delta a_2(k)]^T, \quad (6)$$

где  $X_{\text{РЛС1}}$  и  $X_{\text{РЛС2}}$  – вектора состояния ВО;  $Y_{\text{РЛС1}}$  и  $Y_{\text{РЛС2}}$  – вектора невязки.

Для обработки информации от двух РЛС при ТОИ в угломерном канале будет использоваться алгоритм калмановской фильтрации. Подставляя формулы (3) – (6) в выражения (1) и (2), получим математическую модель ТОИ:

$$X_{\text{ТОИ}}(k) = \frac{b_1(k) X_{\text{РЛС1}}(k) + b_2(k) X_{\text{РЛС2}}(k)}{b_1(k) + b_2(k)}; \quad (7)$$

$$b_1(k) = \frac{1}{Y_{\text{РЛС1}}(k)^2}; \quad (8)$$

$$b_2(k) = \frac{1}{Y_{\text{РЛС2}}(k)^2}. \quad (8)$$

Можно представить в матричном виде формулу (7), подставив в нее матричные представления формул (8) и (9). Полученное в итоге выражение матрицы примет вид

$$X_{\text{ТОИ}}(k) = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где  $\omega_{\text{ТОИ}}$  – угловая скорость азимута;  $a_{\text{ТОИ}}$  – ускорение угла азимута.

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} \varphi_{\text{ГОИ}}(k) \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} &= \frac{|1\ 0\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |1\ 0\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|1\ 0\ 0| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}, \\
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} 0 \\ \omega_{\text{ГОИ}}(k) \\ 0 \end{vmatrix} &= \frac{|0\ 1\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |0\ 1\ 0| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|0\ 1\ 0| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}, \\
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ a_{\text{ГОИ}}(k) \end{vmatrix} &= \frac{|0\ 0\ 1| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_1(k) \\ \omega_1(k) \\ a_1(k) \end{vmatrix} + |0\ 0\ 1| \times \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_2(k) \\ \omega_2(k) \\ a_2(k) \end{vmatrix}}{|0\ 0\ 1| \times \left( \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_1(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_1(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_1(k)^2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 1 \\ \frac{\Delta\varphi_2(k)^2}{1} \\ \frac{1}{\Delta\omega_2(k)^2} \\ \frac{1}{\Delta a_2(k)^2} \end{vmatrix} \right)}. \\
\end{aligned} \tag{13}$$

Выражение (10) для калмановского фильтра ТОИ будет являться уравнением наблюдения, и можно представить, как

$$\varphi_{\text{ТОИ}}(k) = \varphi_{\text{ист}}(k) + \xi_a(k), \quad (14)$$

где  $\varphi_{\text{ист}}$  – истинное значение азимута;  $\xi_a$  – центрированный гауссовский шум с известной дисперсией  $D_a$ .

Алгоритм калмановской фильтрации ТОИ с учетом (10) и (14) имеет вид:

$$X_{\text{ТОИ о}}(k) = \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_3(k) \\ \omega_3(k) \\ a_3(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) & 0 & 0 \\ 0 & \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) & 0 \\ 0 & 0 & \Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$X_3(k) = \begin{vmatrix} \varphi_3(k) \\ \omega_3(k) \\ a_3(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0,5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & (1-\alpha_\Phi T) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k-1) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k-1) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k-1) \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ о}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ о}}(k) \\ a_{\text{ТОИ о}}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varphi_{\text{ТОИ}}(k) \\ \omega_{\text{ТОИ}}(k) \\ a_{\text{ТОИ}}(k) \end{vmatrix}, \quad (16)$$

$$|\Delta\varphi_{\text{ТОИ}}(k)| = |\varphi_{\text{ТОИ}}(k)| - |\varphi_3(k)|. \quad (17)$$

$$P_3(k) = \begin{vmatrix} P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & T & 0,5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & (1-\alpha_\Phi T) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} P_{011}(k-1) & P_{022}(k-1) & P_{013}(k-1) \\ P_{021}(k-1) & P_{022}(k-1) & P_{023}(k-1) \\ P_{031}(k-1) & P_{032}(k-1) & P_{033}(k-1) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} (1-\alpha_\Phi T) & 0 & 0 \\ T & 1 & 0 \\ 0,5T^2 & T & 1 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{\varphi_x} \end{vmatrix}, \quad (18)$$

где  $D_{\varphi_x}$  – среднеквадратическая ошибка шумов возмущения.

$$K_\Phi(k) = \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \times \left\{ \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ P_{311}(k) & P_{312}(k) & P_{313}(k) \\ P_{321}(k) & P_{322}(k) & P_{323}(k) \\ P_{331}(k) & P_{332}(k) & P_{333}(k) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} + R_{\varphi_x} \right\}^{-1}, \quad (19)$$

$$P_0(k) = \begin{vmatrix} P_{011}(k) & P_{022}(k) & P_{013}(k) \\ P_{021}(k) & P_{022}(k) & P_{023}(k) \\ P_{031}(k) & P_{032}(k) & P_{033}(k) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) & P_{\text{э}13}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) & P_{\text{э}23}(k) \\ P_{\text{э}31}(k) & P_{\text{э}32}(k) & P_{\text{э}33}(k) \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} K_{\Phi_1}(k) \\ K_{\Phi_2}(k) \\ K_{\Phi_3}(k) \end{vmatrix} \times \\ \times |1 \quad 0 \quad 0| \times \begin{vmatrix} P_{\text{э}11}(k) & P_{\text{э}12}(k) & P_{\text{э}13}(k) \\ P_{\text{э}21}(k) & P_{\text{э}22}(k) & P_{\text{э}23}(k) \\ P_{\text{э}31}(k) & P_{\text{э}32}(k) & P_{\text{э}33}(k) \end{vmatrix}. \quad (20)$$

### Заключение

Синтезированный алгоритм ТОИ, построенный с учетом динамических весовых коэффициентов, позволяет улучшить точностные характеристики радиоэлектронных следящих систем, в результате увеличивается пропускная способность АС УВД при заданном уровне безопасности.

#### Список литературы

1. Пудовкин, А. П. Перспективные методы обработки информации в радиотехнических системах : монография / А. П. Пудовкин, С. Н. Данилов, Ю. Н. Панасюк. – СПб. : Экспертные решения, 2014. – 256 с.
2. Чернышова, Т. И. Математическое моделирование при анализе метрологической надежности аналоговых блоков информационно-измерительных систем / Т. И. Чернышова, В. В. Третьяков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 1. – С. 42 – 49.
3. Данилов, С. Н. Алгоритм сопровождения с реконfigurацией модели / С. Н. Данилов, Р. А. Ефремов, Н. А. Кольтюков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 418 – 423.
4. Иванов, А. В. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконfigurации / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, С. П. Москвитин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 4. – с. 572-577.
5. Использование динамических характеристик воздушного судна в информационно-измерительных системах / Ю. Н. Панасюк [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 381 – 386.

---

### A Method of Increasing the Accuracy of Tertiary Information Processing Using Dynamic Weighting Coefficients

Yu. N. Panasyuk, A. P. Pudovkin, A. I. Rogachev

*Department of Radio Engineering, Tambov State Technical University,  
Tambov, Russia; resbn@jesby.tstu.ru*

**Keywords:** aircraft; gauging channel; information-measuring systems; model; tertiary information processing.

**Abstract:** The paper proposes a method for the functioning of a goniometer channel of an information and measuring system, taking into account the use of weight coefficients in tertiary information processing. The choice of models of state and observation is justified, simulations on a computer are carried out and the results of the algorithm investigation are presented.

## References

1. Pudovkin A.P., Danilov S.N., Panasiuk Y.N. *Perspektivnye metody obrabotki informatsii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Advanced methods of information processing in radio systems], St. Petersburg: Ekspertnye resheniya, 2014, 256 p. (In Russ.)
2. Chernyshova T.I., Tretyakov V.V. [Mathematical Modeling in the Analysis of Metrological Reliability of Analog Parts of Information-Measuring Systems], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 381-388. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Danilov S.N., Efremov R.A., Koltyukov N. A. [Model Reconfiguration Tracking Algorithm], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 3, pp. 418-423. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Ivanov A.V., Komrakov D.V., Moskvitin S.P., Chernyshov V.N. [Accuracy Characteristics of Navigation Systems Using Continuity Testing of Satellite Navigation Systems for Solving Problems of Reconfiguration], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2015, no. 4, pp. 572-577. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Panasyuk Yu.N., Pudovkin A.P., Knyazev I.V., Glistin V.N. [Use of the dynamic characteristics of an aircraft in information-measuring systems], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, no. 3, pp. 381-386. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Methode zur Erhöhung der Genauigkeit der tertiären Informationsverarbeitung mit der Anwendung der dynamischen Gewichtsverhältnisse**

**Zusammenfassung:** Es ist die Methode des Funktionierens des Winkelmeßkanals des Informations- und Messsystems unter Berücksichtigung der Verwendung von Gewichtungskoeffizienten in der tertiären Informationsverarbeitung entwickelt. Es ist die Wahl der Modelle des Zustandes und der Beobachtung gerechtfertigt, ein Algorithmus der tertiären Informationsverarbeitung ist entwickelt.

---

### **Méthode de l'augmentation de la précision du traitement tertiaire de l'information avec l'application des coefficients dynamiques pondéraux**

**Résumé:** Est conçue la méthode du fonctionnement du canal de mesure angulaire du système informatique de mesure, compte tenu de l'utilisation des coefficients pondéraux dans le traitement tertiaire de l'information. Est justifié le choix des modèles de l'état et de l'observation, de l'algorithme du traitement tertiaire de l'information.

---

**Авторы:** *Панасюк Юрий Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехника»; *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника»; *Розачёв Алексей Игоревич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Данилов Станислав Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## МАКЕТ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СОРТИРОВКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

А. Г. Дивин, П. В. Балабанов, Г. В. Шишкина, Г. В. Мозгова

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
kafedra@uks.tstu.ru*

**Ключевые слова:** алгоритм функционирования; программное обеспечение; робот Fanuc; роботизированный комплекс; сортировка сельскохозяйственной продукции; техническое зрение.

**Аннотация:** Разработан макет роботизированного комплекса для сортировки сельскохозяйственной продукции. Показана процедура настройки системы технического зрения. Приведен алгоритм функционирования и листинг программы сортировки картофеля по размеру.

---

Сортировка овощей и фруктов является обязательной процедурой перед закладкой продукции на хранение или перед отправкой потребителю. Происходит выбраковка из исходной массы образцов, имеющих несоответствующие размеры, а также повреждения, полученные вследствие механических воздействий или фитозаболеваний. В настоящее время сортировка, как правило, предусматривает ручной труд, при котором человек длительное время совершает монотонную и утомительную работу. Поэтому поиск альтернативных методов сортировки сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей.

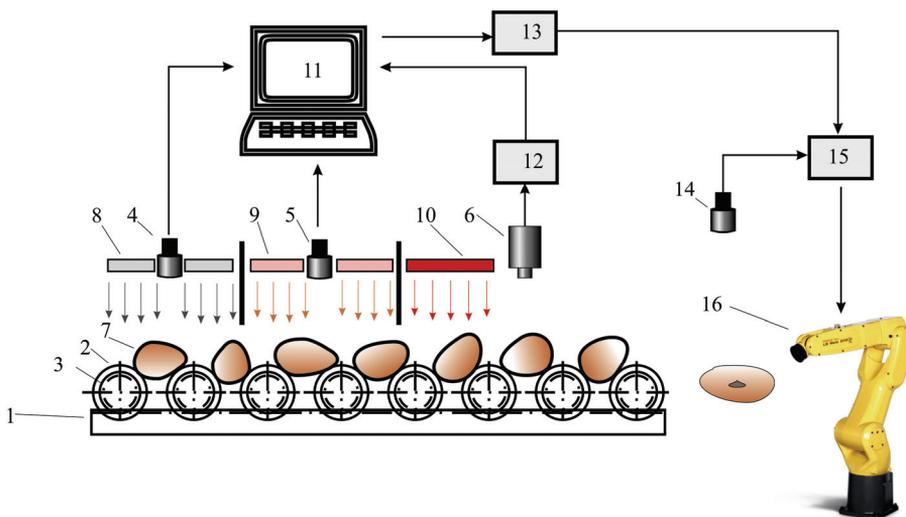
Анализ разработанных роботизированных комплексов для отбраковки объектов растительного происхождения [1 – 8] позволяет сделать вывод о том, что наиболее перспективное направление в данной сфере – это применение систем технического зрения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн электромагнитного спектра. Также в последнее время применение нейронных сетей и нечеткой логики в алгоритмах обработки изображений становится более востребовано.

Несмотря на достаточно большое число разработанных систем технического зрения, все они далеки от совершенства. В частности, решения об отбраковке несоответствующей по качеству продукции в процессе сортировки могут оказаться неверными в силу того, например, что яблоки разного сорта отличаются размерами и структурой, а их качество варьируется от сезона. Поэтому необходимо создание новых методов и алгоритмов сортировки. Также существует явная нехватка математических алгоритмов, ориентированных на компьютеры с высокой производительностью, поддерживающих параллельную обработку для анализа одновременно нескольких объектов.

Предлагаемый роботизированный комплекс для сортировки сельскохозяйственной продукции позволяет распознавать в видимой, ультрафиолетовой и ин-

фракрасной [9 – 10] областях спектра объекты, имеющие поверхностные или подповерхностные дефекты, механические повреждения, несоответствующие форму, размер или цвет. Важным элементом разрабатываемого сортировочного комплекса является система технического зрения, которая получает, обрабатывает и анализирует цифровое изображение объекта при помощи оптического тепловизора, видеокамер, компьютера и других электромеханических устройств. Схема макета роботизированного комплекса для сортировки картофеля показана на рис. 1.

Клубни картофеля 7 перемещаются по роликовому конвейеру, причем каждый клубень находится в ложе между соседними роликами 2, которые совершают линейное перемещение и одновременно вращаются благодаря жестко закрепленной на одной оси зубчатой шестерни 3, перемещающейся по рейке 1. Вращение роликов вызывает вращение клубня, благодаря чему камеры 4, 5 и 6 просматривают большую часть поверхности клубня. При этом камеры 4 и 5 типа Basler acA1920-155um имеют чувствительность в видимом диапазоне длин волн электромагнитного излучения, а камера 6 FLIR A 35 в интервале 8...14 мкм инфракрасного диапазона длин волн. Камера 4 предназначена для регистрации эмиссионного излучения от клубней картофеля, испытывающих воздействие от источника 8 ультрафиолетового излучения. Камера 5 регистрирует отраженный от клубней свет видимого диапазона источников 9, а тепловизор 6 с адаптером 12 – излучение от клубней, испытавших воздействие от инфракрасного нагревателя 10. Система технического зрения, реализованная в среде LabView с библиотекой NI Vision, служит для обработки изображений, поступающих с камер, поиска дефектов и регистрации координат несоответствующих объектов. Используя сигнал энкодера конвейера (на рис. 1 не показан), программно рассчитывается момент времени, в который с компьютера 11 через модуль дискретного выхода 13 поступает сигнал на контроллер 15 манипулятора 16 (Fanuc LRM-200id/4S), благодаря чему возможно удаление дефектного объекта с конвейера. Манипулятор данного типа



**Рис. 1. Схема макета роботизированного комплекса для сортировки картофеля:**

- 1 – рейка; 2 – ролик; 3 – зубчатая шестерня; 4, 5, 6, 14 – камеры; 7 – клубни картофеля;  
8 – источник ультрафиолетового излучения; 9 – источник света видимого диапазона;  
10 – инфракрасный нагреватель; 11 – компьютер; 12 – адаптер;  
13 – модуль дискретного выхода; 15 – контроллер; 16 – манипулятор

имеет также возможность работы с видеокамерой 14, что позволяет ему сортировать клубни по размерам.

Технические средства подсистемы сортировки по размеру включают робот Fanuc и камеру 14, оптическая ось которой расположена над объектом контроля. Если камера установлена на руке робота, то в процессе работы необходимо обеспечить перпендикулярность оптической оси камеры к плоскости  $XU$ , когда робот движется для захвата объекта. Программное обеспечение роботизированной системы сортировки создано в приложении iRPickTool, установленном в контроллера R-30iB.

Процедура настройки системы технического зрения включает несколько этапов: установка центральной точки схвата (ЦТС) робота (точки касания пальцев схвата с захватываемым объектом); установка калибровочной сетки (для настройки камеры); установка системы координат (для определения взаимного расположения камеры и схвата); создание видеопроцесса (где задается форма и размеры распознаваемого объекта); создание управляющей программы для робота.

В качестве рабочего органа предложено использовать пневматический схват Festo, для которого расстояние от фланца крепления на роботе до ЦТС составляет 70 мм. Данное значение при написании программы сохранено в позиционном регистре PR [10] (рис. 2) в целях компенсации размера схвата. Процедура установки ЦТС робота Fanuc стандартная, поэтому в рамках данной работы не приводится.

При установке камеры использовалась типовая процедура, осуществляемая в программе iRVision, а также калибровочная сетка (см. рис. 2) с расстоянием между соседними кругами 25 мм. Параметры видео процесса, задаваемые в данной программе, задавались таким образом, чтобы системой распознавались объекты, имеющие форму, близкую к форме круга или эллипса с радиусом или размером полуоси, равными или меньшими 17 мм.

Управляющая программа имеет структуру, представленную на рис. 3. Она включает основную программу PK\_MAIN, программу инициализации PK\_INIT, программу захвата объекта PK\_PICK и программу PK\_DROP укладки отбракованного объекта. Вызов подпрограмм осуществляется из программы PK\_MAIN в соответствии с алгоритмом, представленном на рис. 3.

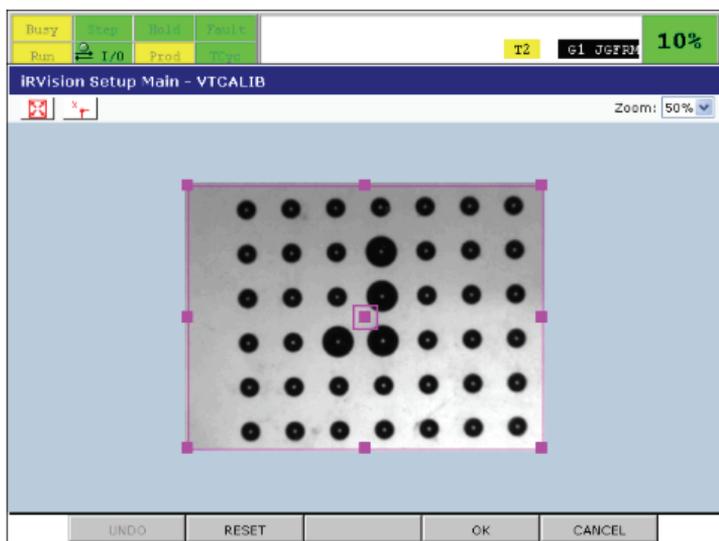
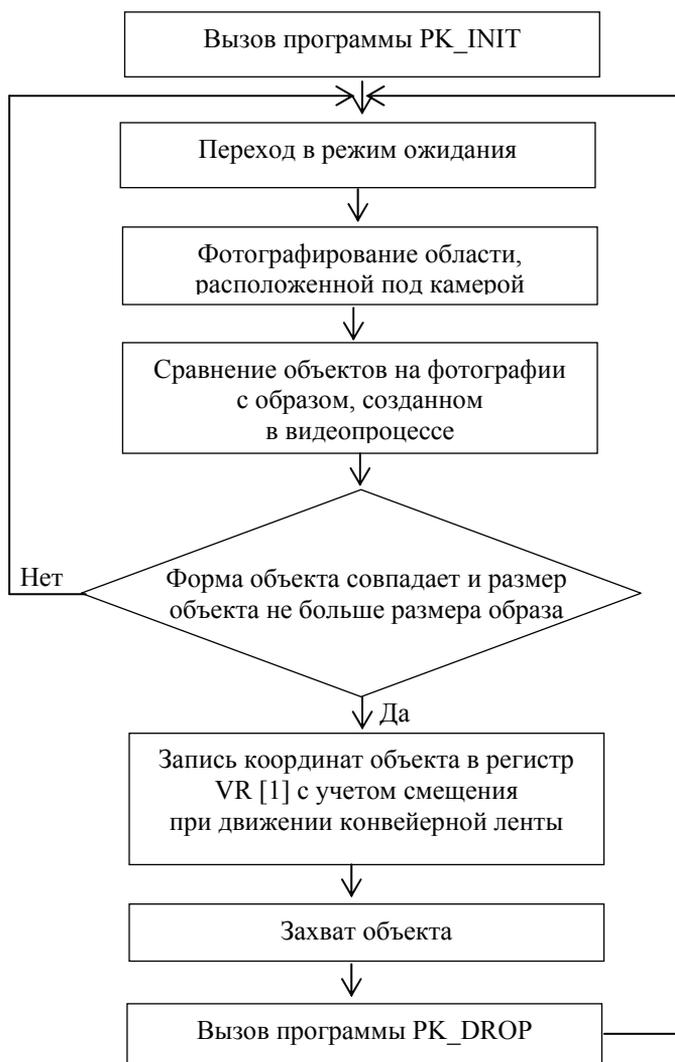


Рис. 2. Изображение калибровочной сетки в программе iRVision



**Рис. 3. Алгоритм функционирования программы PK\_MAIN сортировки картофеля по размеру**

При вызове программы PK\_INIT (листинг 1.2) происходит сброс всех используемых в программах регистров, инициализация регистра PR [10], а также вызов функций, считывающих сигнал энкодера двигателя транспортера infeed и сигнал с камеры FSTN1. Далее робот переходит в режим ожидания. Схват робота расположен в точке P [1], определяемой координатами XYZ, и заданной в режиме обучения. Далее вызывается программа PK\_PICK (листинг 1.3), отвечающая за распознавание объекта контроля и захват объекта, удовлетворяющего требованиям отбраковки (т.е. объекта округлой формы с диаметром меньшим 35 мм).

В программе PK\_PICK осуществляется периодическое (с периодом 50 мс) фотографирование области конвейерной ленты, расположенной перпендикулярно оптической оси камеры. В созданном видеопроцессе осуществляется сравнение объектов на фотографии с эталонным образом, представляющим собой круг диаметром 35 мм. Если на фотографии имеются объекты, форма которых близка к форме

эталонного образа, а их размер не больше размера образа, то координаты распознанного объекта, подлежащего отбраковке, с учетом скорости движения конвейерной ленты, записываются в видеорегистр VR [1]. Полученные координаты в качестве сигнала смещения voffset передаются роботу, который с заданной скоростью 1000 мм/с перемещает схват к объекту и сопровождает объект в течение времени 0,3 с (оператор wait), достаточного для закрытия схвата и захвата объекта.

*Листинг 1.1 Программа PK MAIN:*

Программный код	Комментарий
CALL <b>PK_INIT</b>	Вызов функции инициализации
CALL PKWCSTART	
CALL PK_PERCH	
LBL [100]	Задание параметров инструмента
UTOOL_NUM=0	
UFRAME_NUM=0	
J P [1] 50% CNT100	Переход в позицию ожидания
CALL <b>PK_PICK</b>	Вызов функции захвата
IF R [1]>0, JMP [10000]	Вызов функции укладки
CALL <b>PK_DROP</b>	
IF R [1]>0, JMP [10000]	
JMP LBL [100]	Конец задачи
LBL [10000]	
CALL PKWCEND	
end	

*Листинг 1.2 Программа PK INIT:*

Программный код	Комментарий
PR [10]=LPOS-LPOS	Обнуление позиционного регистра
PR [10,3]=(-70)	
R [1]=0	Считывание сигнала с энкодера двигателя ленточного транспортера
CALL PKCS GETID ('infeed', CStn ID Reg=11)	
CALL PKFS GETID ('FSTN1', FStn ID Reg=12)	
CALL PKFS PUT QUE (Fstn ID=R[12])	Считывание сигнала с камеры
end	

*Листинг 1.3 Фрагмент программы PK PICK:*

Программный код	Комментарий
UFRAME_NUM=0	Задание параметров инструмента и рабочей области
UTOOL_NUM=R [3]	
LBL [100]	Перемещение к объекту
.....	
L P [1] 1000 mm/sec CNT100 VOFFSET, VR [1] Tool_Offset, PR [10]	
L P [1] 500 mm/sec CNT0 VOFFSET, VR [1] Tool_Offset, PR [15]	Выдержка времени, необходимого на закрытие схвата
WAIT. 30(sec)	
.....	
end	

После схватывания объекта вызывается программа PK\_DROP, в соответствии с которой он помещается в емкость для брака.

В связи с утвержденной Правительством программой «Цифровая экономика Российской Федерации» применение роботизированных комплексов, в том числе и в сельском хозяйстве, имеет большие перспективы. Благодаря высоким показателям скорости, грузоподъемности и маневренности роботы успешно заменяют ручной труд, они не знают усталости и не требуют специальных условий труда. К тому же в последнее время цена роботов имеет устойчивую тенденцию к снижению. Уже сейчас в робототехнике достигнуты огромные высоты, и с каждым годом данная сфера будет все больше развиваться, потому что будущее именно за ней.

*Работа выполнена в рамках Соглашения № 14.577.21.0214 с Министерством образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор RFMEFI57716X0214).*

#### *Список литературы*

1. Polder, G. Calibration and characterization of spectral imaging systems / G. Polder, G. W. van der Heijden // Journal of Multispectral and Hyperspectral Image Acquisition and Processing. – 2001. – P. 10 – 17.
2. Di, W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: – Part II: Applications / W. Di, D.-W. Sun // Journal of Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2013. – No. 19. – P. 15 – 28.
3. Toyman, H. A Real-Time Apple Grading System Using Multicolor Space / H. Toyman, H. Kucuk // Journal of Scientific World Journal. – 2014. – P. 10 – 13.
4. Razmjoo, N. A real-time mathematical computer method for potato inspection using machine vision / N. Razmjoo, B. Somayeh Mousavib, F. Soleymani // Computers and Mathematics with Applications. – 2011. – No. 63. – P. 268 – 279.
5. Cubero, S. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables / S. Cubero, N. Aleixos, E. Moltó, J. Gómez-Sanchis, J. Blasco // Journal of Food Bioprocess Technol. – 2011. – No. 4. – P. 487 – 504.
6. Santosh, L. A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration / L. Santosh, L. Sangda, L. Hoonsoo, Cho Byoung-Kwan // Journal of Trends in Food Science & Technology. – 2015. – No. 46. – P. 85 – 98.
7. Mahendran, R. Application of Computer Vision Technique on Sorting and Grading of Fruits and Vegetables / R. Mahendran, G. C. Jayashree, K. Alagusundaram // Journal of Food Processing & Technology. – 2012. – P. 1 – 7.
8. Panitnat, Y. Agricultural Produce Grading by Computer Vision Based on Genetic Programming / Y. Panitnat // International Conference on Robotics and Biomimetics. – 2015.
9. Филатова, А. Г. Температурное поле дисперсного материала в системе контактирующих тел / А. Г. Филатова, А. А. Чуриков, А. Г. Дивин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 16 – 21.
10. Чуриков, А. А. Проектирование оптимального режима проведения неразрушающего теплового контроля малогабаритных изделий / А. А. Чуриков, Н. А. Коньшева, Г. В. Шишкина // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 6 – 14.

## A Model of Robotic Sorting Facility for Agricultural Products

A. G. Divin, P. V. Balabanov,  
G. V. Shishkina, G. V. Mozgova

*Department of Mechatronics and Technological Measurements,  
TSTU, Tambov, Russia; kafedra@uks.tstu.ru*

**Keywords:** algorithm of functioning; software; Fanuc robot; robotic facility; sorting of agricultural products; technical vision.

**Abstract:** A model of a robotic sorting facility for agricultural products is developed. The procedure for setting up the vision system is shown. The algorithm of functioning and the program for sorting potatoes by size are described.

### *References*

1. Polder G., Heijden van der G. W. Calibration and Characterization of Spectral Imaging Systems, *Journal of Multispectral and Hyperspectral Image Acquisition and Processing*, 2001, pp. 10-17.
2. Di W., Sun D.-W. Advanced Applications of Hyperspectral Imaging Technology for Food Quality and Safety Analysis and Assessment, Part II: Applications, *Journal of Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2013, no. 19, pp. 15-28.
3. Toylan H., Kuscü H. A Real-Time Apple Grading System Using Multicolor Space, *Journal of Scientific World Journal*, 2014, pp. 10-13.
4. Razmjoo N., Somayeh Mousavib B., Soleymani F. A Real-Time Mathematical Computer Method for Potato Inspection using Machine Vision, *Computers and Mathematics with Applications*, 2011, no. 63, pp. 268-279.
5. Cubero S., Aleixos N., Moltó E., Gómez-Sanchis J., Blasco J. Advances in Machine Vision Applications for Automatic Inspection and Quality Evaluation of Fruits and Vegetables, *Journal of Food Bioprocess Technol*, 2011, no. 4, pp. 487-504.
6. Santosh L., Sangdae L., Hoonsoo L., Byoung-Kwan Cho. A Review of Vibrational Spectroscopic Techniques for The Detection Of Food Authenticity and Adulteration, *Journal of Trends in Food Science & Technology*, 2015, no. 46, pp. 85-98.
7. Mahendran R., Jayashree G. C., Alagusundaram K. Application of Computer Vision Technique on Sorting and Grading of Fruits and Vegetables, *Journal of Food Processing & Technology*, 2012, pp. 1-7.
8. Panitnat Y. Agricultural Produce Grading by Computer Vision Based on Genetic, *International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2015.
9. Filatova A.G., Churikov A.A., Divin A.G. [Temperature Field of a Dispersed Material in a System of Contacting Bodies], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 16-21. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Churikov A.A., Konyshva N.A., Shishkina G.V. [Designing the Optimal Mode for Conducting Non-Destructive Thermal Control of Small-Sized Products], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22., no. 1, pp. 6-14. (In Russ., abstract in Eng.)

## **Das Modell des Roboterkomplexes zum Sortieren landwirtschaftlicher Produkte**

**Zusammenfassung:** Es ist ein Modell des Roboterkomplexes zum Sortieren landwirtschaftlicher Produkte entwickelt. Die Vorgehensweise des Einrichtens des Sichtsystems ist angezeigt worden. Angegeben sind der Algorithmus des Funktionierens und die Auflistung des Kartoffelsortierungsprogramms nach der Größe.

---

## **Maquette de l'ensemble industriel robotisé pour le triage des produits agricoles**

**Résumé:** Est conçue la maquette de l'ensemble robotisé pour le triage des produits agricoles. Est montrée la procédure du réglage du système de la vision technique. Est cité l'algorithme du fonctionnement et le listing du programme de triage des pommes de terre suivant les dimensions.

---

**Авторы:** *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Шишкина Галина Викторовна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Мозгова Галина Владимировна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДАННЫХ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

**В. Ф. Калинин, Н. М. Зяблов, С. В. Кочергин,  
А. В. Кобелев, Д. А. Джапарова**

*Кафедра «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ»,  
г. Тамбов, Россия; vladimirka@gmail.com*

**Ключевые слова:** моделирование и электроэнергетические системы; нейронные сети; прогнозирование и управление электрической нагрузкой; электрические сети; электроэнергетика.

**Аннотация:** Приведены методы представления данных искусственной нейронной сети для моделирования и управления электроэнергетическими системами. В программе MATLAB реализован алгоритм прогнозирования потребления электрической нагрузки и выполнено моделирование. На основании полученных результатов выбран наиболее эффективный метод представления первичных данных нейронной сети.

---

Единая энергетическая система (ЕЭС) России является уникальным организационно-техническим объектом. Однако централизованная система организации и управления ЕЭС в условиях современной России нуждается в коренной модернизации. Для решения существующих проблем необходим переход отечественной электроэнергетики на новое качество управления путем формирования целостной многоуровневой системы управления с увеличением объемов автоматизации и повышением надежности всей системы, включая самые слабые и уязвимые звенья.

Использование искусственных нейронных сетей (НС) давно находит место в системах управления электроэнергетической отрасли. Причиной является то, что НС дает достаточно высокую точность предсказания, что очень важно в системах управления электроснабжением, при правильном прогнозе потребление энергии повышает энергоэффективность электрических сетей и снижает расход энергоносителей. В данной статье проведены исследования НС прогнозирования потребления электроэнергии для одного из районов г. Тамбова. Используются три метода представления данных – помесечное, подневное и почасовое. Проведена работа с векторами и матрицами. Установлено, что наибольшую точность предсказания дало почасовое представление данных НС, несколько меньшую точность – помесечное, а подневное оказалось бессмысленным для небольших выборок.

В качестве объекта исследования использовались сведения по потреблению электрической энергии одного из районов г. Тамбов.

Для исследований и сравнительного анализа различных способов представления исходных данных НС выбрано три способа представления данных – помес- сячные в течение одного года, подневные – одного месяца и почасовые – 12 меся- цев. Причем первые два способа реализуются в виде векторов, а последний – в виде матрицы, так как для корректной работы нейронных сетей с матричными данными матрицы должны быть квадратными, прямоугольные – не поддержива- ются. В случае с почасовыми данными за счет выбора временного интервала в два часа можно получить матрицу 12×12, которая будет успешно принята системой.

Выдвинуто предположение, что точность предсказания с использованием НС зависит от степени девиации данных, используемых для обучения: чем меньше девиация значений, тем больше точность. Для исследования и анализа первых двух способов использовалась НС со структурой, представленной на рис. 1.

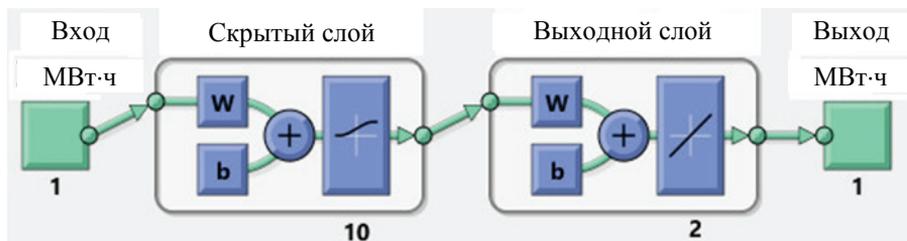
Конфигурация НС выбрана в связи с проведением анализа различных конфи- гураций нейронной сети для выполнения задачи прогнозирования потребления электрической энергии, в котором подобная сеть показала наиболее высокий ре- зультат [1]. Ошибка прогноза определялась с помощью MAPE – средней абсо- лютной ошибки прогноза. Алгоритм наиболее подходит для сравнения результа- тов, полученных из одного массива данных. Формула имеет вид

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}, \quad (1)$$

где  $Y_t, \hat{Y}_t$  – данные из контрольной выборки и полученные в результате прогнози- рования соответственно.

В первом исследуемом способе представления данные за каждый месяц формируют вектор размерностью 1×12, который является элементом для обуче- ния НС. Имеются данные потребления электрической энергии за пять лет, четыре года из которых – для обучения нейронной сети, а данные последнего года ис- пользуются для сравнения со спрогнозированными данными. Данные брались в первый день месяца в 18.00. Время выбрано как наиболее наглядное. Использо- ванные величины изображены на рис. 2.

Данные за разные годы относительно схожи, что в теории даст более высо- кую точность предсказания (см. рис. 2). Один из векторов, используемых для обу- чения, показан в табл. 1. После проведения обучения нейронной сети, выполнения моделирования и подсчета средней абсолютной ошибки прогноза, получен вектор с погрешностями прогноза (табл. 2). Результаты в виде средней абсолютной ошибки прогноза за каждый месяц показаны на рис. 3. Наибольшая ошибка про- гноза присутствует в мае и августе, что связано со многими факторами, в том числе со скачками температуры в один и тот же месяц разных лет. Усредненная абсолютная ошибка прогноза составила 6,25 %, что является достаточно точным предсказанием.



**Рис. 1. Нейронные сети для работы с векторными данными, имеющие 10 нейронов с функцией активации *logsig* в скрытом слое и два нейрона с линейной функцией активации *purelin* в выходном слое**

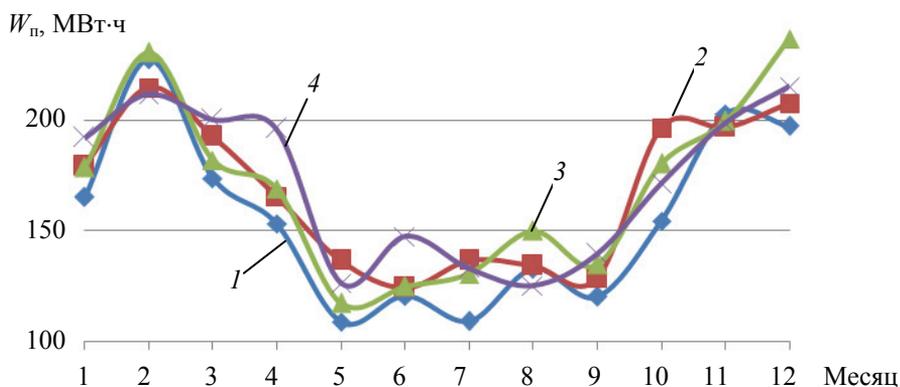


Рис. 2. Данные, использованные для прогнозирования  
 месячного потребления энергии  $W_{п}$ , годы:  
 1 – 2012; 2 – 2013; 3 – 2014; 4 – 2015

Таблица 1

**Пример вектора потребления энергии (МВт·ч),  
 использовавшегося для обучения**

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
$W_{п}$	165,19	227,31	173,83	153,48	108,97	120,69
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$W_{п}$	109,29	133,07	120,38	154,44	202,96	197,51

Таблица 2

**Вектор погрешности прогноза потребления энергии (МВт·ч)**

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
$W_{п}$	1,71	0,57	1,01	6,26	19,15	9,74
Месяц	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
$W_{п}$	2,83	15,69	2,07	4,30	5,38	6,29

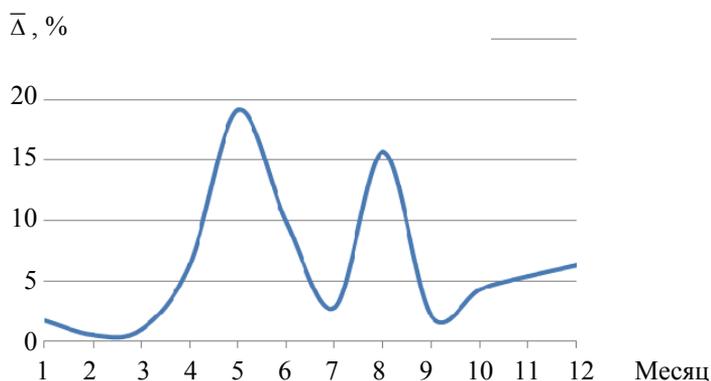
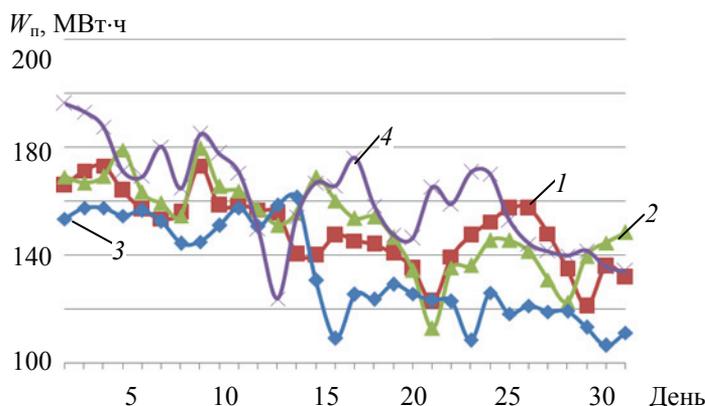


Рис. 3. Средняя абсолютная ошибка  $\bar{\Delta}$  прогноза за каждый месяц



**Рис. 4. Данные для исследования подневногo способа предсказания, годы:**  
1 – 2013; 2 – 2014; 3 – 2012; 4 – 2015

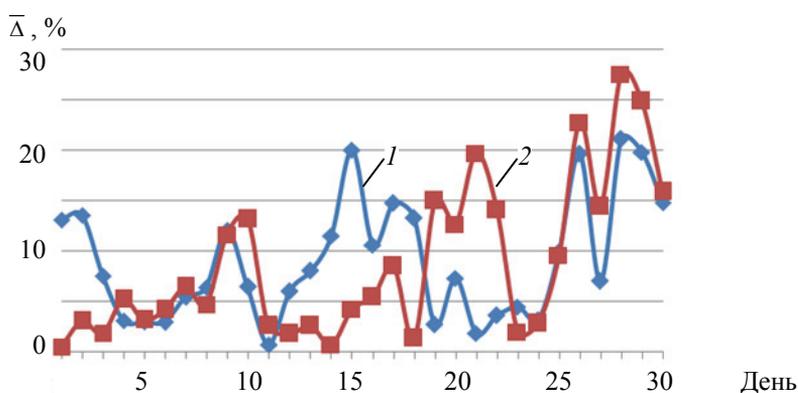
После исследования помесечного предсказания потребления электроэнергии, проведем исследование подневногo предсказания. Исходный массив данных в виде векторов показан на рис. 4. Данные более хаотичные, чем помесечные, что в теории дает более высокую среднюю абсолютную ошибку прогноза, несмотря на увеличение объема данных в виде 30 значений в одном векторе. Вектор для обучения имеет размерность  $1 \times 30$ , данные взяты за апрель в 18.00, образец такого вектора показан в табл. 3.

Результат моделирования электрической нагрузки с описанными параметрами изображен на рис. 5. Из рисунка видно, что ошибка прогноза стала больше, чем в случае прогнозирования помесечно, что связано с большей хаотичностью первичных данных, использованных для обучения. Для наглядности, на рисунке помимо данных моделирования НС присутствует результат прогноза с помощью усреднения первичных данных. Очевидно, что графики схожи, причем усредненная ошибка прогнозирования при помощи нейронной сети составила 9,1 %, тогда как ошибка прогноза усреднением составила 8,7 %. Вывод: при небольшой выборке использование нейронных сетей для подневногo прогнозирования потребления электрической нагрузки не имеет смысла, поскольку уступает даже простейшему методу усреднения данных.

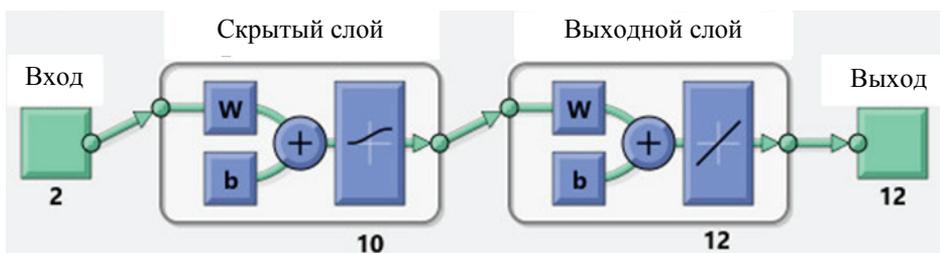
Таблица 3

**Пример вектора потребления энергии (МВт·ч) с подневными данными, использовавшийся для обучения**

День	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$W_{п}$	153,4	157,4	157,5	154,5	156,4	152,3	144,4	144,9	150,9	157,5
День	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$W_{п}$	150,5	158,3	161,3	130,5	109,1	125,4	123,5	129,1	125,6	123,1
День	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$W_{п}$	122,8	108,4	126,0	118,2	121,1	118,9	119,0	113,1	106,4	111,1



**Рис. 5. Результат подневногo прогнозирования потребления энергии:**  
1 – нейронные сети; 2 – усреднение



**Рис. 6. Нейронные сети для работы с матрицей размером 12×12**

После исследования двух векторных методов прогнозирования, а именно, месячного и подневногo, исследуем матричный почасовой метод прогнозирования потребления электрической энергии. Для работы НС с матрицами они должны быть квадратными, то есть размером  $N \times N$ . В случае с почасовым прогнозированием имеем матрицу с 12-ю месяцами года и 12-ю временными отрезками, что соответствует размерности  $12 \times 12$ .

Помимо правильного формирования исходных данных необходимо изменить конфигурацию нейронной сети для работы с матрицами, что заключается в увеличении числа нейронов в выходном слое до размерности матрицы, другими словами в выходном слое будет 12 нейронов с линейной функцией активации. Такая НС изображена на рис. 6.

Одна из матриц с данными, использованная для обучения, показана табл. 4. Хаотичность данных прогноза находится на уровне хаотичности исходных данных, поэтому можно говорить о том, что подобный подход должен дать высокую точность предсказания, не более 6,25 %, полученных в месячном прогнозировании. В результате обучения нейронной сети, моделирования и подсчета ошибки прогноза получена табл. 5.

Согласно проведенным исследованиям, наиболее эффективным для прогнозирования потребления электрической энергии являются месячный и почасовой способы. Наиболее перспективным является почасовой, но он требует большого массива данных (одна итерация для обучения требует 144 показания), в то время как месячный – всего 12. Применение того или иного способа должно быть обосновано требованиями по необходимым данным прогноза – месячным или почасовым.

Таблица 4

## Пример матрицы потребления энергии (МВт·ч) для обучения

Время	Месяц					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
0:00	130,0	154,0	128,2	112,2	91,6	105,8
2:00	112,0	138,3	114,4	97,2	78,0	86,6
4:00	104,9	134,1	110,5	93,7	73,9	79,5
6:00	116,6	167,4	143,5	94,3	93,1	96,0
8:00	138,2	210,1	173,7	108,2	127,8	129,6
10:00	154,4	221,2	184,4	111,1	136,6	146,5
12:00	157,2	214,9	177,3	107,3	136,2	146,1
14:00	157,7	207,9	173,9	104,7	138,6	145,1
16:00	162,3	198,8	167,4	104,7	133,9	139,0
18:00	189,5	209,4	166,0	109,1	125,7	130,8
20:00	189,8	222,2	197,9	133,5	126,2	127,7
22:00	164,8	191,0	167,6	132,0	136,7	138,6
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
0:00	100,1	95,1	100,4	115,8	128,4	150,9
2:00	83,6	81,2	86,8	101,7	113,5	130,8
4:00	75,9	76,6	80,9	97,3	109,7	124,9
6:00	77,6	90,0	93,8	133,1	144,1	144,9
8:00	98,0	121,9	118,2	175,5	189,3	185,9
10:00	116,7	137,5	130,7	192,6	195,3	198,5
12:00	119,7	138,0	128,8	188,9	190,7	194,2
14:00	119,2	137,5	126,7	188,5	188,6	189,2
16:00	118,2	134,1	122,6	187,4	189,6	191,0
18:00	116,3	126,0	125,4	197,7	211,4	223,3
20:00	117,8	129,5	157,5	201,9	196,6	215,6
22:00	133,6	133,2	135,1	165,9	164,2	188,6

Таблица 5

## Средняя абсолютная ошибка прогноза при использовании почасового метода в процентах

Время	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0:00	2	6	8	14	3	0	2	2	2	2	3	13
2:00		5	7	15	2	1	4	1	4	5	6	
4:00	1	4	6	13	1	4	9	3	3	2	2	10
6:00		10	3	8	18	3	12	13	12	3	4	3
8:00		14	10	6	21		11	11	16	2	1	2
10:00	2	8	6	8	11	2	7	9	13	6	0	0
12:00		5	3	10	6	3	5	10	12	5	2	1
14:00	0	4			4	5	4	9	11	6	1	
16:00	3	2	0	11	3	6	2	4		3	7	8
18:00	1	1	5	18	10	5	7	0	15	3	0	4
20:00		2	1	9	3		5	11	8	1	6	5
22:00		4	3	11	1	7	5	5	0	6	1	9
Среднее		5	5		7		4	6	6	9	4	3

### Список литературы

1. Зяблов, Н. М. Прогнозирование бытовой электрической нагрузки с применением нейронных сетей / Н. М. Зяблов, Т. И. Чернышова, А. В. Кобелев, С. В. Кочергин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2017 – № 1 (21). – С. 181 – 190.
2. Зяблов, Н. М. Прогнозирование потребления электрической энергии / Н. М. Зяблов, Д. А. Джапарова, С. В. Кочергин // Энергосбережение и эффективность в технических системах / М-во образования и науки Рос. Федерации, ФГБОУ «Тамб. гос. техн. ун-т». – Тамбов, 2017. – 284 с.
3. Кочергин, С. В. Нейронные сети и фрактальное моделирование электроэнергетических систем / С. В. Кочергин, А. В. Кобелев, Н. А. Хребтов // Fractal Simulation. – 2012. – № 1 (3). – С. 6 – 15.
4. Зыбин, А. А. Современные проблемы высших гармоник в городских системах электроснабжения / А. А. Зыбин, А. В. Кобелев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011 – № 1 (17). – С. 187 – 191.

---

## The Analysis of Methods of Data Presentation of Artificial Neuron Networks for Electric Power Systems Control

V. F. Kalinin, N. M. Zyablov, S. V. Kochergin,  
A. V. Kobelev, D. A. Dzhaparova

*Department of Electrical Power Engineering, TSTU, Tambov, Russia;  
vlladimirka@gmail.com*

**Keywords:** electric networks; electric power industry; forecasting and control of electrical load; modeling and electric power systems; neural networks.

**Abstract:** Methods for representing data of an artificial neural network for modeling and control of electric power systems are presented. The MathLAB software implemented an algorithm for predicting the consumption of electrical load; simulation was performed. The most effective method of presenting the primary data of a neural network is chosen on the basis of the results obtained.

### References

1. Zyablov N.M., Chernyshova T.I., Kobelev A.V., Kochergin S.V. [Forecasting household electrical load with the use of neural networks], *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* [Models, Systems, Networks in Economics, Technology, Nature and Society], 2017, no. 1 (21), pp. 181-190. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Zyablov N.M., Dzhaparova D.A., Kochergin S.V. [Forecasting the consumption of electrical energy], *Energoberezhenie i effektivnost' v tekhnicheskikh sistemakh* [Prognostirovanie Potrebleniya Elektricheskoy Ehnergii Energy Saving and Efficiency in Technical Systems], Tambov, 2017, 284 p. (In Russ.)
3. Kochergin S.V., Kobelev A.V., Hrebtov N.A. [Neural networks and fractal modeling of electric power systems], *Fraktal'noe modelirovanie* [Fractal Simulation], 2012, no. 1 (3), pp. 6-15. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Zybin A.A., Kobelev A.V. [Modern Problems of Higher Harmonics in Urban Power Supply Systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, no. 1 (17), pp. 187-191. (In Russ., abstract in Eng.)

## **Analyse der Techniken zur Darstellung der Daten des künstlichen neuronalen Netzwerks für elektroenergetische Systeme**

**Zusammenfassung:** Es sind die Methoden der Darstellung der Daten des künstlichen neuronalen Netzes zur Modellierung und Steuerung von elektrischen Energiesystemen vorgestellt. Im Programm MathLAB ist der Algorithmus zur Vorhersage des Stromverbrauchs der elektrischen Belastung implementiert und die Simulation durchgeführt. Auf der Grundlage der erhaltenen Ergebnisse ist die effektivste Methode zur Darstellung der Primärdaten des neuronalen Netzes ausgewählt.

---

## **Analyse des méthodes de la présentation des données du réseau artificiel des neurones pour la gestion des systèmes électroénergétiques**

**Résumé:** Sont mentionnées les méthodes de la présentation des données du réseau artificiel des neurones pour la modélisation et la gestion des systèmes électroénergétiques. Dans le programme de MathLAB est mis en œuvre l'algorithme de la prévision de la consommation de la charge électrique; est effectuée la simulation. A la base des résultats obtenus, est choisie la méthode la plus efficace de la présentation des données primaires du réseau de neurones.

---

**Авторы:** *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика»; *Зяблов Никита Михайлович* – магистрант; *Кочергин Сергей Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика»; *Кобелев Александр Викторович* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика»; *Джапарова Динара Амангельдиевна* – аспирант кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Шувалов Анатолий Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Альтернативные источники энергии взамен жидкого топлива», ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве» (ФГБНУ ВНИИТиН), г. Тамбов, Россия.

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ  
ДОКУМЕНТОВ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ:  
ДОКУМЕНТЫ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ НА МНОЖЕСТВЕ  
СОСТОЯНИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

**Е. Б. Герасимова<sup>1</sup>, Б. И. Герасимов<sup>2</sup>, В. В. Гудошников<sup>2</sup>,  
А. А. Стреха<sup>2</sup>, А. Ю. Сизикин<sup>3</sup>**

*ФГБОУ ВО «Финансовый университет при правительстве  
Российской Федерации» (1), г. Москва, Россия;  
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» (2), г. Москва, Россия;  
кафедра «Экономический анализ и качество», ФГБОУ ВО «ТГТУ» (3),  
г. Тамбов, Россия; sizikin@bk.ru*

**Ключевые слова:** документ по стандартизации; множество; подсистема; система; состояние функционирования; структура; эффективность.

**Аннотация:** Рассмотрены теоретические и методологические принципы разработки и построения структуры документов по стандартизации на множестве состояний функционирования, позволяющих формализовать процессы институциональной эффективности структуры построения документов по стандартизации и создать единое информационное поле документов по стандартизации как оптимального кластера структур построения оригиналов документов по стандартизации.

---

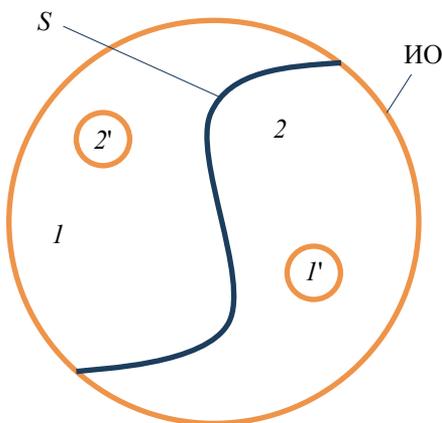
### Введение

Наблюдаемость счетного множества документов по стандартизации гарантирует ст. 2, п. 1 [1], согласно которой «документ по стандартизации – документ, в котором «...устанавливаются общие (собственные – *прим. авт.*) характеристики (функции качества – *прим. авт.*), а также правила (максима – оптимальность, функции качества – *прим. авт.*) и общие принципы (жизненный цикл объекта стандартизации и документа по стандартизации – *прим. авт.*) в отношении объекта стандартизации...».

Цель работы – разработка и построение структуры документов по стандартизации на множестве состояний функционирования, позволяющих формализовать процессы институциональной эффективности стандартизации в Российской Федерации.

### Теоретический анализ

Схема феноменологического поля документов по стандартизации представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема феноменологического поля документов по стандартизации:**  $1, 2$  – счетные множества объектов стандартизации и документов по стандартизации соответственно;  $1', 2'$  – счетные подмножества объектов стандартизации и документов по стандартизации соответственно; ИО – институциональная оболочка;  $S$  –  $S$ -образная функция развития процессов стандартизации

Такая диссипация полезности (энергии) процессов стандартизации в связи с переходом части полезности упорядоченных процессов в полезность неупорядоченных обуславливает множество состояний функционирования документов по стандартизации.

Технология Летова–Калмана [2, 3] в пространстве проектирования документов по стандартизации позволяет идентифицировать по критерию качества документ по стандартизации как открытую динамическую систему с концептуальной моделью вида

$$\bar{M}(t) = K(t) \cdot \bar{M}(t) + P(t) \cdot \bar{y}(t),$$

где  $\bar{M}(t)$  –  $n$ -мерный вектор состояния документа по стандартизации в виде обобщенного множества состояний функционирования документа;  $K(t)$  – матрица функций качества документа по стандартизации;  $P(t)$  – прямоугольная матрица распределения с вероятностью

$$P[\bar{M}(t)] = P[m(t)], \quad m(t) \in \bar{M}(t)$$

корректирующих и управляющих воздействий на документ по стандартизации;  $Y(t)$  –  $m$ -мерный вектор коррекции и управления документом по стандартизации со стороны технических комитетов по стандартизации (ТК) и потребителей объекта стандартизации.

Декомпозиция модели (рис. 2) отображает структуру документа по стандартизации как системы в виде объединения подсистем:  $\Pi_{\text{МВК}}$  – «Миссия, видение и кредо документа по стандартизации»;  $\Pi_{\text{С}}$  – «Общие (собственные) характеристики объекта стандартизации»;  $\Pi_{\text{ПП}}$  – «Правила и общие принципы в отношении объекта стандартизации»;  $\Pi_{\text{КТ}}$  – «Концепт-термины объекта стандартизации и документа по стандартизации»:

$$\Pi_{\text{МВК}} \cup \Pi_{\text{С}} \cup \Pi_{\text{ПП}} \cup \Pi_{\text{КТ}},$$

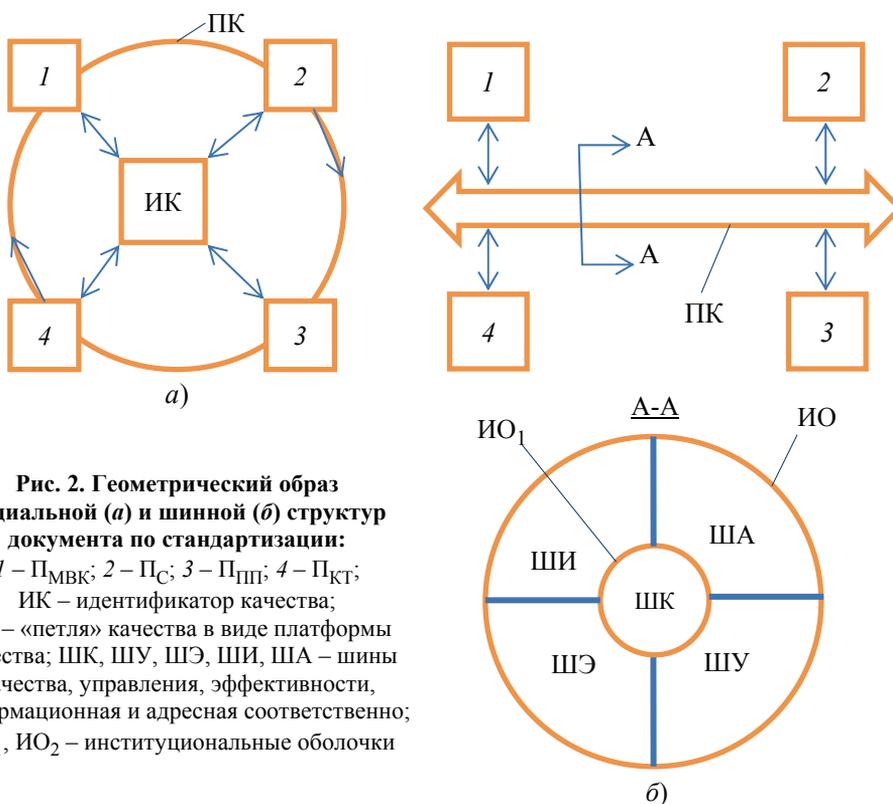
Стандарт объединения  $\cup$  по качеству документа по стандартизации выстраивает две конкурирующие структуры документа: радиальную (см. рис. 2, а) и шинную (платформенную) (см. рис. 2, б).

Расслоенное пространство эффективности документа по стандартизации  $X$  формирует сечения расслоения  $f$  в виде

$$f_i : X \rightarrow B_i, \quad i = \overline{1,3},$$

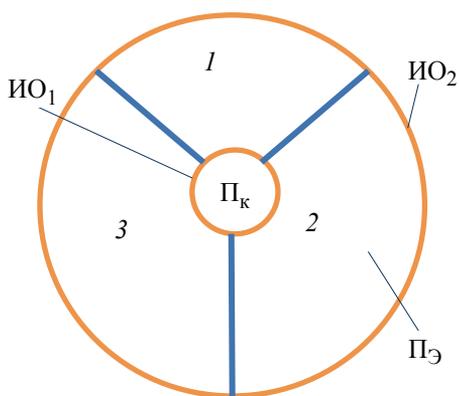
где  $f_i$ ,  $i = \overline{1,3}$  – сечения расслоения;  $X$  – расслоенное пространство эффективности;  $B_i$ ,  $i = \overline{1,3}$  – база расслоения по институциональным нормам.

Проекция  $\Pi$  расслоения идентифицируется по институциональным нормам схемой сценарного моделирования вида и представлена на рис. 3, где  $\Pi_{\text{к}}$  – про-



**Рис. 2. Геометрический образ радиальной (а) и шинной (б) структур документа по стандартизации:**  
 1 – П<sub>МВК</sub>; 2 – П<sub>С</sub>; 3 – П<sub>ПП</sub>; 4 – П<sub>КТ</sub>;  
 ИК – идентификатор качества;  
 ПК – «петля» качества в виде платформы качества; ШК, ШУ, ШЭ, ШИ, ША – шины качества, управления, эффективности, информационная и адресная соответственно;  
 ИО<sub>1</sub>, ИО<sub>2</sub> – институциональные оболочки

странство поля качества документа; ИО<sub>1</sub>, ИО<sub>2</sub> – институциональные оболочки; П<sub>Э</sub> – пространство эффективности; 1 – П<sub>Э1</sub> = f<sub>1</sub>(ЭП<sub>С</sub>, ЭП<sub>ПП</sub>, ЭП<sub>КТ</sub>); 2 – П<sub>Э2</sub> = f<sub>2</sub>(ЭП<sub>МВК</sub>, ЭП<sub>ПП</sub>, ЭП<sub>КТ</sub>); 3 – П<sub>Э3</sub> = f<sub>3</sub>(ЭП<sub>МВК</sub>, ЭП<sub>С</sub>, ЭП<sub>КТ</sub>); П<sub>Э1</sub>, П<sub>Э2</sub>, П<sub>Э3</sub> – слои пространства расслоения эффективности документа по стандартизации; ЭП<sub>МВК</sub>, ЭП<sub>С</sub>, ЭП<sub>ПП</sub>, ЭП<sub>КТ</sub> – эффективности подсистем структуры документа по стандартизации как системы.



**Рис. 3. Геометрический образ проекции расслоения пространства эффективности документа по стандартизации**

### Методика исследования

Для кластера стационарных документов по стандартизации (подлинники) институциональную эффективность состояния функционирования документа по стандартизации целесообразно рассчитывать по формуле [4]:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n e_i p_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $n$  – общее число подсистем системы структуры документа по стандартизации;  $\mathcal{E}$  – структурная эффективность;  $e_i$  –  $i$ -я эффективность подсистемы;  $p_i$  – вероятность состояния функционирования подсистемы.

Таблица 1

**Данные по расчету институциональной эффективности структуры построения документа по стандартизации\***

Обозначения эффективности подсистем документа	Вероятность/Эффективность	Проекция		
		П <sub>Э1</sub>	П <sub>Э2</sub>	П <sub>Э3</sub>
Э <sub>ПМВК</sub>	R <sub>МВК</sub> /ε <sub>МВК</sub>	0/1	0,9/1	
Э <sub>ПС</sub>	R <sub>С</sub> /ε <sub>С</sub>	0,9/1	0/0	0,9/1
Э <sub>ППП</sub>	R <sub>ППП</sub> /ε <sub>ППП</sub>		0,9/1	0/0
Э <sub>ПКТ</sub>	R <sub>КТ</sub> /ε <sub>КТ</sub>	0,5/1	0,9/1	
Институциональная эффективность структуры документа по стандартизации Э	–	2,3	2,7	

\* Данные получены по результатам статистических и квалиметрических наблюдений и измерений и дополнены заключениями экспертов по стандартизации ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ».

Данные по выбору институциональной структуры документа по стандартизации приведены в табл. 1.

### Результаты исследования

Опознание структуры документов по стандартизации по институциональной эффективности в соответствии с итоговыми данными (см. табл. 1) выделяет концепт-принципы построения документа по стандартизации в виде постулатов.

*Постулат 1.* Поле документов по стандартизации

$$П_{ДСТ} = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_i, \dots, p_n\}, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $n$  – число документов по стандартизации, актуализируется в информационном поле национального института стандартизации в соответствии с требованиями института Федерального закона от 29 июня 2015 года № 162 – ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» и выстраивает систему;

$$С_{ДСТ} = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_i, \dots, c_n\},$$

где  $n$  – число документов по стандартизации по признаку структуры построения системы.

*Постулат 2.* Полезность документа по стандартизации как системы полностью наблюдаема, если структура документа содержит в качестве подсистемы набор концепт-терминов (терминосистема), определяющих устойчивое состояние функционирования документа по стандартизации.

*Постулат 3.* Ядром структуры документа по стандартизации, как системы, является подсистема общих, только самых существенных характеристик объекта стандартизации в виде оптимальных функций качества парето-оптимального состояния функционирования жизненного цикла документа по стандартизации.

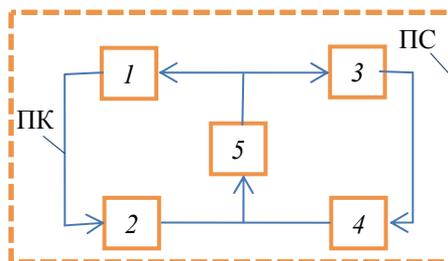
*Постулат 4.* Институциональным регулятором подсистемы общих характеристик объекта стандартизации состояния функционирования документа по стандартизации как системы выступает подсистема правил и общих принципов в отношении объекта стандартизации системной структуры документа по стандартизации.

*Постулат 5.* Документы по стандартизации как интегративность качества национального института стандартизации идентифицируются в информационном поле информационно-производственной парадигмы стандартизации как эффективные институциональные документы по стандартизации благодаря наличию в структуре их системного построения подсистемы миссии, видения и кредо счетного ограниченного множества документов по стандартизации. Это гарантирует единство с институциональной средой национального института стандартизации подсистем структуры документа по стандартизации как системы и обеспечивает коммуникативность любого документа по стандартизации  $ДСТ_i \in M_{ДСТ}$ , где  $M_{ДСТ}$  – счетное множество документов по стандартизации,  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  – число документов по стандартизации.

*Постулат 6.* Миссия, видение и кредо как атрибуты качества документа по стандартизации наблюдаемы и управляемы атрибутами качества миссии, видения и кредо национального института стандартизации в рамках жизненного цикла документа по стандартизации, а также атрибутами качества миссии, видения и кредо объекта стандартизации.

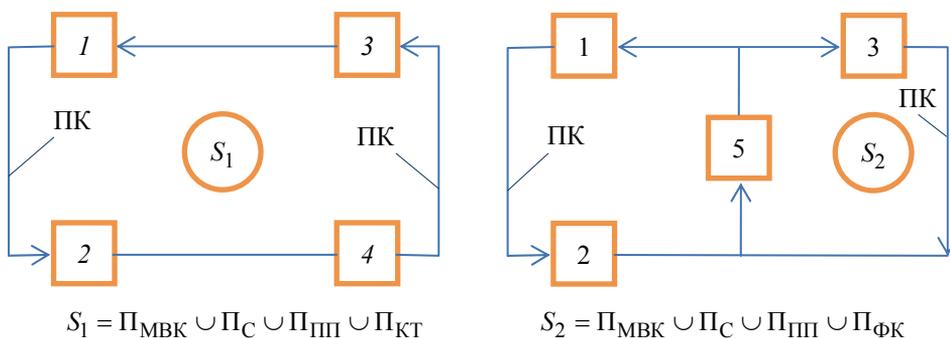
*Постулат 7.* Необходимым и достаточным условием нормального (устойчивого) состояния функционирования документа по стандартизации является актуализация «мостиковой» структуры построения документа по стандартизации.

*Постулат 8.* При наличии внешних и внутренних возмущений институциональной среды информационно-производственной парадигмы стандартизации работоспособны по запросу живучести нижеследующие структуры  $S$  документов по стандартизации (рис. 5) [5, 6].



**Рис. 4. Поле структуры документа по стандартизации как системы:**

ПС – институциональное поле структуры;  
 1 – подсистема  $П_{МВК}$ ; 2 – подсистема  $П_C$ ;  
 3 – подсистема  $П_{ПП}$ ; 4 – подсистема  $П_{КТ}$ ;  
 5 – подсистема функции качества документа:



$$S_1 = П_{МВК} \cup П_C \cup П_{ПП} \cup П_{КТ}$$

$$S_2 = П_{МВК} \cup П_C \cup П_{ПП} \cup П_{ФК}$$

**Рис. 5. Структура построения документа по стандартизации (начало):**

ПК – петли качества;  $П_{ФК}$  – подсистема функций качества

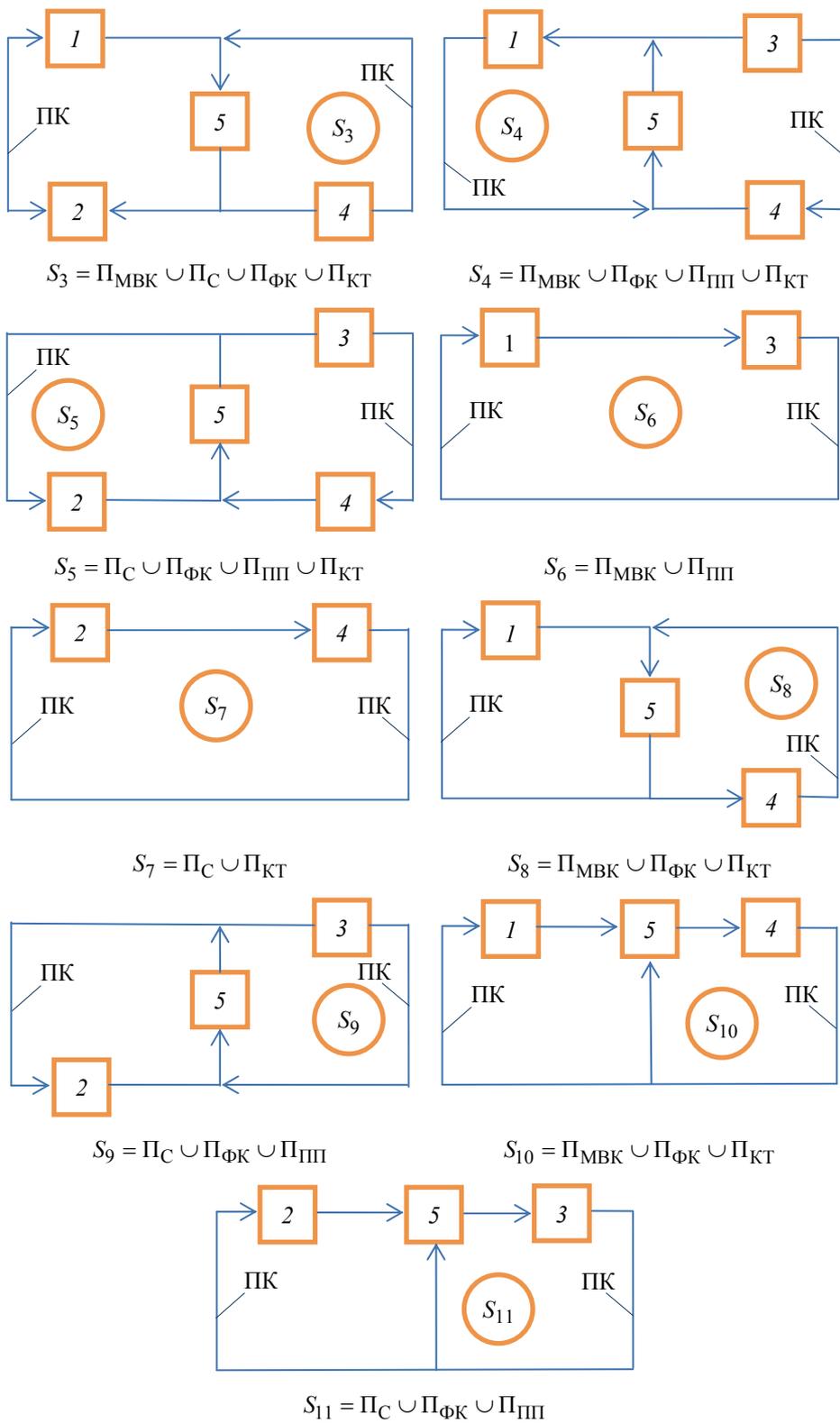


Рис. 5. Окончание

## Заключение

Инварианты структуры документа по стандартизации как системы статично отображены в ст. 2, п. 1 [1] через комплементарное взаимодействие подсистемы общих характеристик объекта стандартизации  $P_C$  и подсистемы правил и общих принципов в отношении объекта стандартизации  $P_{III}$ .

Динамическое отображение подсистем  $P_C$  и  $P_{III}$  (см. рис. 5) в турбулентной институциональной среде нарушает устойчивое состояние функционирования документа по стандартизации, «порождая» при этом вариативные части подсистем  $P_C$  и  $P_{III}$ :  $P_{МВК} \in P_C$  и  $P_{КТ} \in P_{III}$ , которые функционируют, в свою очередь, как надсистемы системы документа по стандартизации. Более того, надсистема миссии, видения и кредо  $P_{МВК}$  обеспечивает управляемость документа по стандартизации, а надсистема концепт-терминов  $P_{КТ}$  – наблюдаемость документа по стандартизации как системы. Предлагаемая мостиковая (радиальная) структура построения документа по стандартизации препятствует формированию эффекта асимметрии информации по качеству документа по стандартизации между производителем документа по стандартизации (национальный институт по стандартизации) и потребителями оригиналов документов. Синергетика эффективности институциональной среды процессов проектирования оригиналов документов по стандартизации демпфирует (смягчает, устраняет) при этом институциональные ловушки, которые вызывают отторжение оригинала документа по стандартизации от институциональной среды его состояния функционирования в поле эффективности национального института стандартизации. Так идентифицируются теньевые копии документов по стандартизации.

Структура документов по стандартизации (см. рис. 5) формирует оптимальный кластер структур построения оригиналов документов по стандартизации, обеспечивая при этом «боевую» живучесть каждого документа из счетного множества документов по стандартизации благодаря способности документа после воздействия на него «вызовов» турбулентной институциональной среды продолжать состояние функционирования (работоспособность) в целях полного или частичного выполнения миссии, видения и кредо документа по стандартизации, объекта стандартизации и национального института стандартизации.

### *Список литературы:*

1. О стандартизации в Российской Федерации : федер. закон от 29 июня 2015 года № 162-ФЗ. – М. : СТАНДАРТИНФОРМ, 2015. – 72 с.
2. Летов, А. М. Динамика полета и управление / А. М. Летов. – М. : Наука, 1969. – 360 с.
3. Калман, Р. Очерки по математической теории систем / Р. Калман, П. Фалб, М. Арбиб. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
4. Муромцев, Ю. Л. Определение границ эффективности и работоспособности сложных систем / Ю. Л. Муромцев // Автоматика и телемеханика. – 1988. – № 4. – С. 164 – 176.
5. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М. : Радио и связь, 1984. – 238 с.
6. Черкесов, Г. Н. Методы и модели оценки живучести сложных систем / Г. Н. Черкесов. – М. : Знание, 1987. – 32 с.

7. Дякин, В. Н. Динамическая модель управления развитием промышленного предприятия / В. Н. Дякин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 304 – 308.

8. Интегрированная модель информационно-производственной системы / В. Г. Матвейкин [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 4. – С. 550 – 558.

9. Разработка информационной системы электронного документооборота управления фундаментальных и прикладных исследований / М. Н. Краснянский [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 21, № 2. – С. 216 – 230.

---

## Identification of the Structure of Standardization Documents: Standardization Documents on the Set of States of Functioning

E. B. Gerasimova<sup>1</sup>, B. I. Gerasimov<sup>2</sup>, V.V. Gudoshnikov<sup>2</sup>,  
A. A. Strekha<sup>2</sup>, A. Yu. Sizikin<sup>3</sup>

*Financial University under the government of the Russian Federation (1), Moscow, Russia;*

*FGUP "STANDARTINFORM" (2), Moscow, Russia;*

*Department of Economic Security and Quality TSTU (3),*

*Tambov, Russia; sizikin@bk.ru*

**Keywords:** standardization document; efficiency; functioning state; set; structure; system, subsystem.

**Abstract:** The article considers theoretical and methodological principles of development and construction of the structure of standardization documents on the set of states of functioning. This allows formalizing the processes of institutional effectiveness of the structure of standardization documents and creating a single information field of standardization documents as an optimal cluster of the construction structures for original documents on standardization.

### References

1. *O standartizatsii v Rossiiskoi Federatsii* [On standardization in Russian Federation], Russian Federal law dated 29 June 2015 N.162-FZ, Moscow: STANDARTINFORM, 2015, 72 p. (In Russ.)

2. Letov A.M. *Dinamika poleta i upravlenie* [Flight Dynamics and control], Moscow: Nauka, 1969, 360 p. (In Russ.)

3. Kalman R., Falb P., Arbib M. *Ocherki po matematicheskoi teorii sistem* [Essays on mathematical systems theory], Moscow: Editorial URSS, 2004, 400 p. (In Russ.)

4. Muromtsev Y.L. [Determination of the boundaries of the effectiveness and efficiency of complex systems], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and remote control], 1988, No. 4, p. 164-176. (In Russ.)

5. Ryabinin I. A., Cherkosov G. N. *Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem* [Logical and probabilistic methods of research of reliability of structurally complex systems], Moscow: Radio i svyaz', 1984, 238 p. (In Russ.)

6. Cherkosov G. N. *Metody i modeli otsenki zhivuchesti slozhnykh sistem* [Methods and models for assessing the survivability of complex systems], Moscow: Znanie, 1987, 32 p. (In Russ.)

7. Dyakin V.N. [Dynamic Model of Management of Industrial Enterprise Development], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 2, pp. 304-308. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Popov, N.S., Dmitrieva O.V. [Integrated model of information production systems], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 550-558. (In Russ., abstract in Eng)

9. Krasnyansky M.N., Obukhov A.D., Karpushkin S.V., Ostroukh A.V. [The Development of the information system of electronic document management fundamental and applied studies], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 21, no. 2, pp. 216-230. (In Russ., abstract in Eng)

---

### **Identifikation der Struktur der Dokumente für Zertifizierung: Dokumente für Zertifizierung auf der Menge der Betriebszustände**

**Zusammenfassung:** Es sind die theoretischen und methodischen Prinzipien der Entwicklung und Konstruktion der Struktur der Normungsdokumente auf der Menge von Betriebszuständen betrachtet, die erlauben, die Prozesse der institutionellen Effektivität der Struktur der Normungsdokumente zu formalisieren und ein einheitliches Informationsfeld für Standardisierungsdokumente als ein optimales Cluster von Strukturen für die Konstruktion der Originaldokumente für die Standardisierung zu schaffen.

---

### **Identification de la structure des documents de normalisation: documents de la normalisation sur l'ensemble des états du fonctionnement**

**Résumé:** Sont considérés les principes théoriques et méthodologiques de la conception et de la construction de la structure des documents de normalisation sur l'ensemble des états du fonctionnement permettant de formaliser les processus de l'efficacité institutionnelle de la structure de la construction des documents de normalisation et de créer un champ unique des documents de normalisation en tant que meilleur cluster des structures de la construction des documents originaux de normalisation.

---

**Авторы:** *Герасимова Елена Борисовна* – доктор экономических наук, профессор департамента учета, анализа и аудита, ФГБОУ ВО «Финансовый университет при правительстве Российской Федерации», г. Москва, Россия; *Герасимов Борис Иванович* – доктор экономических наук, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник департамента научных исследований и образовательной деятельности; *Гудошников Владимир Васильевич* – руководитель учебно-консультационного центра департамента научных исследований и образовательной деятельности; *Стреха Анатолий Александрович* – кандидат экономических наук, доцент, директор департамента научных исследований и образовательной деятельности, ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия» (ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»), г. Москва, Россия; *Сизикин Александр Юрьевич* – кандидат экономических наук, доцент, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Экономический анализ и качество», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Савин Константин Николаевич* – доктор экономических наук, доктор технических наук, профессор кафедры Менеджмент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

УДК 66.022.54

DOI: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.626-634

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА  
ДЛЯ СМЕСИТЕЛЬНОГО АППАРАТА  
С ПОДВИЖНОЙ ЛЕНТОЙ**

**А. Б. Капранова, И. И. Верлока, М. Н. Бакин, П. А. Яковлев**

*Кафедра «Теоретическая механика»,  
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,  
г. Ярославль, Россия; kapranova\_anna@mail.ru*

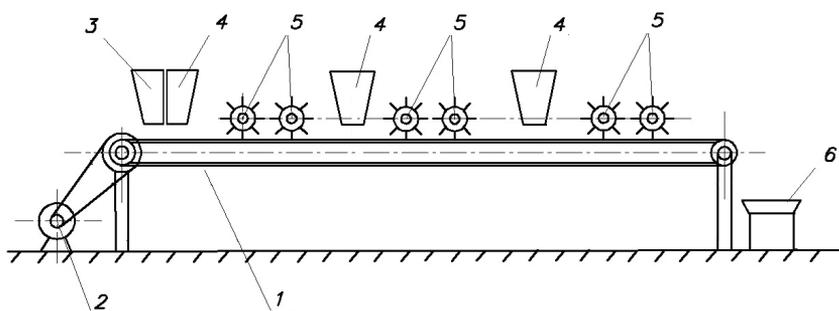
**Ключевые слова:** барабанно-ленточный смеситель; конструктивно-режимные параметры; ленточный конвейер; сыпучие компоненты; щеточные элементы.

**Аннотация:** Предложена инженерная методика расчета ленточного конвейера для смесительного аппарата с подвижной горизонтальной лентой, предназначенного для порционного смешивания твердых дисперсных компонентов с соотношением 1:10 и более, с учетом объемных долей сыпучих материалов и особенностей составляющих элементов конвейера и смесительных барабанов со щеточными элементами. Выполнен соответствующий пример расчета ленточного конвейера. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании нового смесительного оборудования для переработки сыпучих компонентов с указанным соотношением объемных долей сыпучих компонентов, в том числе увлажненных (или обладающих ярко выраженной склонностью к агломерации).

---

**Введение**

Необходимым этапом успешного проектирования смесительного оборудования является разработка инженерной методики расчета, основанной на анализе результатов теоретических [1, 2] и экспериментальных [3] исследований соответствующего технологического процесса согласно системному подходу [4]. Получение сыпучей смеси в аппарате (рис. 1) с подвижной горизонтальной лентой и смесительными барабанами, установленными над ней и имеющими на цилиндрических поверхностях щеточные элементы с винтовой навивкой [5], предполагает использование в качестве рабочих компонентов не только сухие твердые дисперсные материалы, но и увлажненные (или обладающие ярко выраженной склонностью к агломерации [6]). В данном случае помимо расчета конструктивно-режимных параметров смесительного барабана требуется оценка параметров элементов ленточного конвейера [7 – 9] как одного из основных рабочих частей проектируемого смесительного устройства.



**Рис. 1. Принципиальная схема**

**барабанно-ленточного смесителя сыпучих материалов:**

1 – ленточный транспортер; 2 – электродвигатель, 3, 4 – бункеры-дозаторы; 5 – смесительные барабаны со щеточными элементами; 6 – приемное устройство

**Выбор параметров проектируемого ленточного конвейера**

Параметры проектируемого ленточного конвейера (рис. 1) традиционно делятся на два вида:

– конструктивные  $A = \{A_{s3} = \text{const}\}$ ,  $s_3 = 1, \dots, u_3$ ,

$$A = \{L_{\text{л}}, L_{\text{к}}, l_{\text{р}}, l_{\text{х}}, l_{\text{бн1}}, l_{\text{бн2}}, l_0\}, \quad u_3 = 7; \quad (1)$$

– режимные  $B = \{B_{s4}\}$ ,  $s_4 = 1, \dots, u_4$ ,

$$B = \{H, v_{\text{л}}\}, \quad u_4 = 2, \quad (2)$$

где  $L_{\text{л}}$  – ширина ленты транспортного конвейера, м;  $L_{\text{к}}$  – длина проекции конвейера на горизонтальную плоскость, м;  $l_{\text{р}}$  и  $l_{\text{х}}$  – шаги рабочих и холостых роlikоопор, м;  $l_{\text{бн1}}$ ,  $l_{\text{бн2}}$  – максимальная ширина для загрузочных бункеров компонентов 1 и 2, м;  $l_0$  – расстояние между первым загрузочным бункером и осью приводных валов конвейера, м;  $H$  – высота подъема сыпучих материалов, м;  $v_{\text{л}}$  – скорость движения ленты конвейера, м/с.

Проектируемый ленточный конвейер, на котором оседают как загружаемые сыпучие компоненты, так и получаемая смесь после работы смесительных барабанов в  $n_m$  узлах аппарата (рис. 1), имеет следующие параметры:

– входные  $X = \{X_i\}$ ,  $i = 1, \dots, r_3$ :

$$X = \{Q_i, n_{Vi}, N_{\text{в.к}}, N_{\text{д.к}}\}, \quad i = 1, \dots, n_k; \quad r_3 = 2n_k + 2; \quad (3)$$

– выходные  $Y = \{Y_v\}$ ,  $v = 1, \dots, r_4$ :

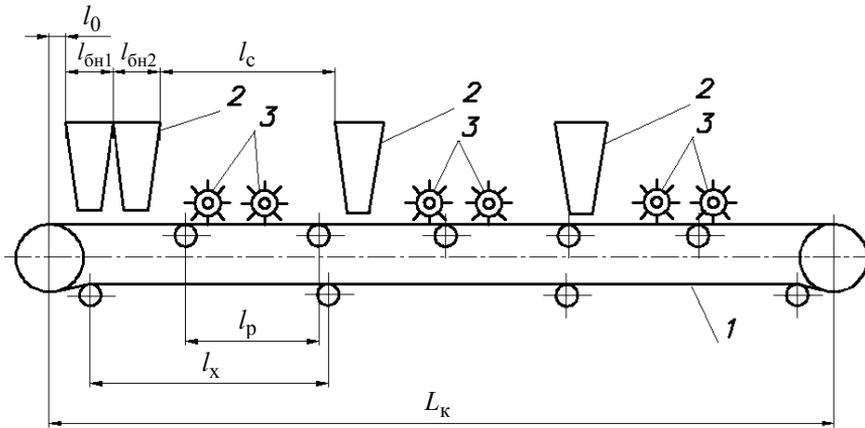
$$Y = \{Q_i, n_{Vi}, N_{\text{в.к}}, N_{\text{д.к}}, N_m\}, \quad i = 1, \dots, n_k; \quad r_4 = 2n_k + 2, \quad (4)$$

где  $Q_i$  – объемные расходы, м<sup>3</sup>/ч;  $n_{Vi}$  – объемные доли сыпучих материалов в готовой смеси;  $N_{\text{в.к}}$ ,  $N_{\text{д.к}}$  – мощности соответственно приводного вала и двигателя конвейера;  $N_{\text{к}}$  – полная мощность привода смесительного аппарата.

Для двухкомпонентной смеси ( $i = 1, 2$ ), которая должна получиться в проектируемом аппарате (рис. 2), имеем

$$X = \{Q_1, Q_2, n_{V1} = 1, n_{V2} = n_V, N_{\text{в.к}}, N_{\text{д.к}}\}, \quad r_3 = 6; \quad (5)$$

$$Y = \{Q_1, Q_2, n_{m1} = 1, n_{m2} = n_m, N_{\text{в.к}}, N_{\text{д.к}}, N_{\text{к}}\}, \quad \tau = 1, \dots, n_{\tau}, \quad r_4 = 7 + n_{\tau}. \quad (6)$$



**Рис. 2. Схема к инженерному расчету смесителя с подвижной лентой:**  
 1 – ленточный транспортер; 2 – бункеры;  
 3 – барабаны со щеточными элементами

Кроме того, при проектировании смесителя должны учитываться особенности: физико-механические для зернистых материалов и составляющих элементов конвейера (гибкой ленты, плужкового разгрузчика и т.п.)  $P_{kd} = \{P_{kdl}\}$ ,  $l = 1, \dots, r_5$ ; множество параметров смесительных барабанов: конструктивных  $a_1 = \{a_{k1} = \text{const}\}$ ,  $k_1 = 1, \dots, u_{a1}$  и режимных  $b_1 = \{b_{k2}\}$ ,  $k_2 = 1, \dots, u_{b2}$ . Тогда в дополнение к входным параметрам можно отнести:

$$P_{kd} = \{\rho_{ni}, \omega_p, \omega_y, m_{L_k}, G_p, W_{pp}, K_S(\mu, \psi_{0L}), K_0, \eta_k, \bar{f}_{Lb}\}, \quad i = 1, \dots, n_k; \quad r_3 = n_k + 9; \quad (7)$$

$$a_1 = \{L_{\sigma}, r_{\sigma}, l_{ц.б}\}, \quad u_{a1} = 3; \quad (8)$$

$$b_1 = \{h_0, h_L, n_{mb}\}, \quad u_{b2} = 3, \quad (9)$$

где  $\rho_{ni}$  – насыпные плотности смешиваемых сыпучих компонентов,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\omega_p$ ,  $\omega_y$  – коэффициенты сопротивления соответственно ленточного транспортера (учитывающий тип опор роликов конвейера и условия его работы) и барабана;  $m_{L_k}$  – коэффициент, зависящий от длины конвейера и расположения привода;  $G_p$  – масса вращающихся частей роlikоопоры,  $\text{кг}$ ;  $W_{pp}$  – сопротивление плужкового разгрузчика (при его наличии),  $\text{кг}$ ;  $K_S(\mu, \psi_{0L})$  – функция от коэффициента сцепления барабана с лентой  $\mu$  и угла его обхвата лентой  $\psi_{0L}$ ;  $K_0$  – коэффициент, учитывающий условия работы конвейера;  $\eta_k$  – КПД привода;  $\bar{f}_{Lb} = (f_{Lb \min} + f_{Lb \max})/2$  – усредненное значение фрикционного параметра по интервалу его изменения согласно (9);  $L_{\sigma}$  и  $r_{\sigma}$  – ширина и радиус барабана соответственно,  $\text{м}$ ;  $l_{ц.б}$  – длина цилиндрического била,  $\text{м}$ ;  $\bar{\omega} = (\omega_{j3 \min}^* + \omega_{j3 \max}^*)/2$  – среднее значение в общем диапазоне изменения угловых скоростей вращения барабанов из (9),  $\text{рад/с}$ ;  $h_0$  и  $h_L$  – высоты зазора и слоев сыпучих материалов,  $\text{м}$ ;  $n_{mb}$  – общее число барабанов, равное удвоенному значению числа смесительных узлов  $n_{mU}$ , участвующих в процессе получения сыпучей смеси,  $n_{mb} = 2n_{mU}$ .

### Описание работы блок-схемы расчета ленточного конвейера

Рассмотрим блок-схему предлагаемого расчета ленточного конвейера (рис. 3).

Блок 1 устанавливает набор входных данных расчета:

– физико-механические характеристики для сыпучих материалов и составляющих элементов конвейера  $P_{kd} = \{P_{kdl}\}$ ,  $l = 1, \dots, r_5$ , из (5);

– параметры барабанов:  $a_1 = \{a_{k1} = \text{const}\}$ ,  $k_1 = 1, \dots, u_{a1}$ , из (6) и  $b_1 = \{b_{k2}\}$ ,  $k_2 = 1, \dots, u_{b2}$ , из (7);

– требуемые характеристики конвейера:  $Y = \{Y_v\}$ ,  $v = 1, \dots, r_4$ , из (6).

Определение длины транспортной ленты  $L_k$  (блок 2) проводится исходя из габаритов и числа бункеров, вычисленных согласно  $X = \{X_i\}$ ,  $i = 1, \dots, r_3$ , из (5), смесительных узлов в соответствии с  $\{a_{k1} = \text{const}\}$ ,  $\{b_{k2}\}$  из (8), (9). Учитывая, что  $n_{mb} = 2n_\tau$ , где  $n_\tau$  – число стадий смешивания сыпучих компонентов, расчет искомых значений параметров из набора  $A^* = \{L_k^*, l_p^*, l_x^*\}$  при заданных  $l_{бн1}, l_{бн2}, l_0$ , проводится по формулам:

$$L_k^* = 3l_c + l_{бн1} + 3l_{бн2} + 2l_0; \quad (10)$$

$$l_x^* = (L_k^* - 2l_0) / n_\tau; \quad (11)$$

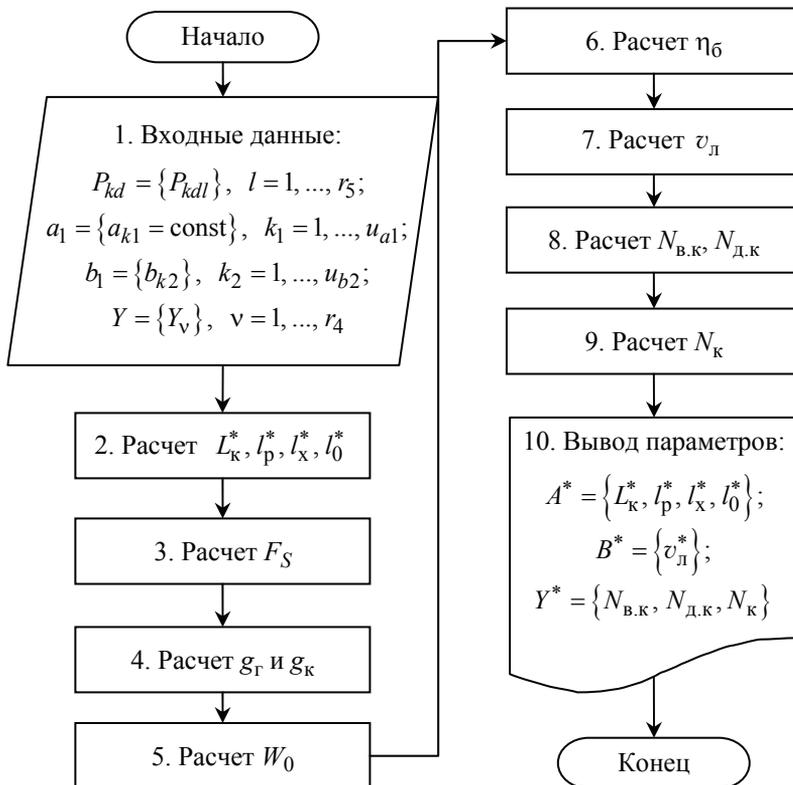


Рис. 3. Блок-схема расчета проектируемых параметров ленточного транспортера сыпучих материалов

$$l_p^* = (L_k^* - l_0 - l_{\text{бн1}} - l_{\text{бн2}}) / (n_\tau + 1), \quad (12)$$

где  $l_c$  – расстояние между бункерами с компонентом 2 (длина смесительного узла), м, вычисляемое с помощью выражения

$$l_c = 8(r_{\text{б}} + l_{\text{ц.б}}) + r_{\text{б}}, \quad (13)$$

В блоке 3 рассчитывается площадь поперечного сечения  $F_S$  для слоя смеси сыпучих материалов на поверхности ленты согласно толщине слоя сыпучих материалов  $h_L$  и заданной ширине ленты  $L_L$  (значение последней определяется при расчете конструктивно-режимных параметров для смесительного барабана)

$$F_S = L_L h_L. \quad (14)$$

Блок 4 традиционным способом [7 – 9] оценивает погонные весовые нагрузки на ленточный конвейер согласно (1):

– от груза  $g_\Gamma$  при непрерывном потоке груза на конвейере (среднее количество груза на одном метре длины конвейера)

$$g_\Gamma = F_S \sum_{i=1}^2 \rho_{\text{ни}}^2; \quad (15)$$

– движущихся частей конвейера  $g_K$

$$g_K = 2g_L + G_p (1/l_p + 1/l_x), \quad (16)$$

где  $g_L$  – погонная нагрузка от ленты, кг/м.

Тяговая сила конвейера  $W_0$  с учетом результатов из (15), (16) и наборов (1), (2), (7) определяется в блоке 5 по известной формуле [7 – 9]

$$W_0 = [\omega_p L_\Gamma (g_\Gamma + g_K) \pm gH] m_{L_k} + W_{\text{пр}}. \quad (17)$$

Блоки 6 – 10, согласно выражениям

$$\eta_{\text{б}} = [1 + \omega_{\text{б}} (2K_S - 1)]^{-1}; \quad (18)$$

$$v_L^* = \bar{\omega} (r_{\text{б}} + h_0) / \bar{f}_{Lb}; \quad (19)$$

$$N_{\text{в.к}} = W_0 v_L^* / (102 \eta_{\text{б}}); \quad (20)$$

$$N_{\text{д.к}} = K_0 N_{\text{в.к}} / \eta_K; \quad (21)$$

$$N_K = N_{\text{в.к}} + N_{\text{д.к}} + n_{\text{б}} N_{\text{б}}, \quad (22)$$

оценивают:  $\eta_{\text{б}}$  – КПД барабанов;  $v_L$  – значение скорости транспортерной ленты согласно результатам расчета для режимных параметров смесительного барабана;  $N_{\text{в.к}}$  и  $N_{\text{д.к}}$  – мощности приводного вала и двигателя конвейера в соответствии со значениями  $K_0$  и  $\eta_K$  из набора (7), а также полную мощность привода  $N_m$  смесительного аппарата с учетом мощности привода всех смесительных барабанов  $N_{\text{б}}$  и транспортерной ленты  $N_{\text{д.к}}$ .

Заключительный блок 10 выводит полученные наборы параметров расчета

$$A^* = \{L_k^*, l_p^*, l_x^*\}, \quad B^* = \{v_L^*\}, \quad Y^* = \{N_{\text{в.к}}, N_{\text{д.к}}, N_K\}, \quad (23)$$

которые могут быть использованы при проектировании смесителя.

### Пример расчета ленточного конвейера

Рассмотрим пример расчета ленточного конвейера в составе разработанного смесительного аппарата согласно блок-схеме на рис. 3. Приведем основные этапы расчета.

1. Задаются входные данные (блок 1) для работы блок-схемы расчета конвейера в численной форме: массовая производительность смесителя, то есть масса смеси, получаемая в единицу времени ( $Q = 16,8$  т/ч), и насыпная плотность, например  $\rho_n = 1,381 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> для формовочной смеси, которая применяется для изготовления отливок блоков цилиндров двигателей на втором конвейере в литейном цехе серого чугуна ОАО «Автодизель» (г. Ярославль). В состав последней входят: песок ГОСТ 2138–91, бентонит сухой ГОСТ 28177–89, крахмалит ЭКР ТУ 18-8-14–80, уголь молотый ГОСТ 410134.

2. Определение длины транспортной ленты (блок 2) проводится, исходя из габаритов и количества: бункеров, вычисленных по заданной производительности аппарата  $Q$  и объемному соотношению смешиваемых компонентов; смесительных узлов

$$L_k = 3l_c + l_{бн1} + 3l_{бн2} + 2l_0 = 3 \cdot 1,2 + 0,2 + 3 \cdot 0,4 + 2 \cdot 0,2 = 5,4 \text{ м.}$$

3. Вычисляется площадь поперечного сечения слоя смеси сыпучих материалов на поверхности ленты (блок 3), исходя из толщины слоя сыпучих материалов  $h_L$  и ширины ленты  $L_d$ :  $F_S = 0,7 \cdot 2,25 \cdot 10^{-2} = 1,575 \cdot 10^{-2}$  м<sup>2</sup>.

5. Рассчитывается погонные весовые нагрузки: от груза (блок 4) и движущихся частей конвейера по формуле (16) при  $g_d = 2,04$  кг/м,  $G_p = 19$  кг,  $l_p = 1$  м,  $l_x = 2$  м:  $g_T = 1,575 \cdot 10^{-2} \cdot 1381 = 21,75$  кг/м;  $g_K = 2 \cdot 2,04 + 19 + 19/2 = 32,58$  кг/м.

6. Оценивается тяговая сила конвейера (блок 5) по формуле (17) при  $\omega_p = 0,022$ ;  $L_T = 10$ ;  $H = 0$ ;  $m_{L_k} = 1,5$ ;  $W_{пр} = 0$ ;  $W_0 = [0,022 \cdot 10(21,75 + 32,58)] \cdot 1,5 = 17,93$  кг.

7. Для КПД барабанов (блок 6) из (18) при  $\omega_y = 0,04$ ;  $K_S = 2,25$  имеем:  $\eta_6 = [1 + 0,04 \cdot (2 \cdot 2,25 - 1)]^{-1} = 0,88$ .

7. Блок 7 с помощью (19) и данных для общего диапазона изменения фрикционного параметра позволяет вычислить  $v_{д}^* = 0,68$  м/с.

8. В блоке 8 проводится расчет мощности на приводном валу по формуле (20):  $N_{в.к} = 17,93 \cdot 0,68 / (102 \cdot 0,88) = 0,136$  (кВт); мощности электродвигателя при  $\eta_k = 0,7$  и  $K = 1,1$  (легкие условия работы) (21):  $N_{д.к} = 1,1 \cdot 0,136 / 0,7 = 0,214$  (кВт). Из (22) с учетом (19) – (21) полная мощность привода аппарата  $N_k$  (блок 9) равна 0,758 кВт.

Тип ленты конвейера выбирается согласно условиям работы конвейера, характеристикам транспортируемой смеси сыпучих материалов и необходимой прочности. В соответствии с ГОСТ 20–85 (лента 3-800-3-ТК-100-3-Б) лента конвейерная имеет: тип 3, общее назначение, ширину 800 мм, три прокладки из ткани ТК-100 с рабочей обкладкой толщиной 3 мм из резины класса Б. Рассчитанные параметры конвейера:

Производительность конвейера, т/ч.....	16,8
Длина конвейера, м .....	5,4
Ширина ленты, м .....	0,8

Расстояние между роlikоопорами ветвей, м:	
рабочей .....	1
холостой .....	2
Мощность на приводном валу, кВт.....	0,136
Мощность электродвигателя, кВт .....	0,214
Полная мощность приводов аппарата, кВт.....	0,758

### Заключение

Предложенная блок-схема расчета параметров ленточного конвейера смесительного аппарата может быть использована при проектировании нового смесителя валково-ленточного типа, предназначенного для порционного смешивания твердых дисперсных материалов в соотношении 1:10 и более, в том числе увлажненных или склонных к агломерации. Приведенный пример расчета ленточного конвейера наглядно иллюстрирует работу соответствующей блок-схемы.

#### *Список литературы*

1. Бакин, М. Н. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя [Электронный ресурс] / М. Н. Бакин, А. Б. Капранова, И. И. Верлока // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 5-5. – С. 928 – 933.
2. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц / А. Б. Капранова [и др.] // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. – 2013. – Т. 56, вып. 6. – С. 83 – 86.
3. Верлока, И. И. Экспериментальные исследования процесса трехстадийного смешивания сыпучих сред 1:10 в разреженных потоках [Электронный ресурс] / И. И. Верлока, А. Б. Капранова // *Международный студенческий научный вестник*. – 2015. – № 3-2. – С. 199 – 200. – Режим доступа : <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=12370> (дата обращения: 27.07.2017).
4. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука. – 1985. – 440 с.
5. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капранова [и др.] // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.279-288
6. Влияние влажности сыпучих сред на их распределение в рабочем объеме смесителя с подвижной лентой / А. Б. Капранова [и др.] // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 97 – 104. doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.097-104
7. Брус, И. Д. Расчет ленточного транспортера : учеб.-метод. указания по самостоятельной работе по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» / И. Д. Брус, Н. С. Тураев. – Томск : Изд. Томского политехнического университета, 2008. – 21 с.
8. Позынич, Е. К. Расчет ленточного конвейера : учеб. пособие / Е. К. Позынич, К. П. Позынич. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2006. – 66 с.
9. Спиваковский, А. О. Транспортирующие машины / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. – М. : Машиностроение, 1983. – 487 с.

## A Method of Designing the Belt Conveyor for Mixer with Movable Belt

A. B. Kapranova, I. I. Verloka, M. N. Bakin, P. A. Yakovlev

*Department of Theoretical Mechanics, Yaroslavl State Technical University,  
Yaroslavl, Russia; kapranova\_anna@mail.ru*

**Keywords:** drum-ribbon mixer; belt conveyor; brush elements; design-regime parameters; loose components.

**Abstract:** We propose an engineering technique for calculating a belt conveyor for mixing device with a movable horizontal belt intended for batch mixing of solid disperse components with 1:10 ratio and more, given the volume fractions of bulk materials and features of constituent of conveyor elements and mixing drums with brush elements. An appropriate example of belt conveyor calculation is made. The results obtained can be used in the design of new mixing equipment for loose components processing with specified ratio of bulk fractions of free-flowing components, including moistened (or with a pronounced tendency to agglomeration).

### References

1. Bakin M.N., Kapranova A.B., Verloka I.I. [Investigation of the distribution of bulk components in the working volume of the drum-ribbon mixer], *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 5-5, pp. 928-933. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kapranova A.B., Bakin M.N., Lebedev A.E., Zajcev A.I. [Investigation of impact mixing of solid disperse media in secondary collisions of particles], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Khimiya khimicheskaya tekhnologiya* [Russian journal of chemistry and chemical technology], 2013, vol. 56, no. 6, pp. 83-86. (In Russ.)
3. Verloka I.I., Kapranova A.B. *Mezhdunarodnyy studencheskiy nauchnyy vestnik* [International Student Scientific Bulletin], 2015, no. 3, pp. 199-200, available at: <http://eduherald.ru/ru/article/view?id=12370> (accessed 27 July 2017). (In Russ.)
4. Kafarov, V.V., Dorokhov I. N., Arutyunov S. Yu. *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protssesy izmel'cheniya i smesheniya sypuchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.)
5. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zajcev A.I. [Methods of Description of Solid Dispersive Mediums Motion in Different Planes for Mixer Drum Sections], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.279-288 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zajcev A.I. [Influence of Particles Humidity on their Distribution in the Working Volume of a Blender with a Moving Ribbon], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 97-104. (In Russ., abstract in Eng.), doi: 10.17277/vestnik.2015.01.pp.097-104
7. Brus I.D., Turayev N.S. *Raschet lentochnogo transportera* [Calculation of a belt conveyor], Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo instituta, 2008, 21 p. (In Russ.)
8. Pozynich Ye.K., Pozynich K.P. *Raschet lentochnogo konveyera* [Calculation of a conveyor belt], Khabarovsk: Izdatel'stvo DVGUPS, 2006, 66 p. (In Russ.)
9. Spivakovskiy A.O., D'yachkov V.K. *Transportiruyushchiye mashiny* [Transporting machines], Moscow: Mashinostroenie, 1983, 487 p. (In Russ.)

## **Беречунгсметһоде дес Бандфөредерерс фүр Мисчгерäte мит дем мобилем Банд**

**Зусамменfassung:** Es ist Engineering-Methode zur Berechnung des Bandförderers für den Mischer mit einem beweglichen horizontalen Band vorgeschlagen, der für die portionsweise Mischung von teilchenförmigen Komponenten mit dem Verhältnis von 1:10, und mehr, mit Rücksicht auf die Volumenanteile von Schüttgut und Besonderheiten der Bestandteile des Bandförderers und der Mischtrommeln mit Bürstenelementen vorgesehen ist. Das entsprechende Beispiel der Berechnung des Bandförderers ist erfüllt. Die erhaltenen Ergebnisse können bei der Projektierung der neuen Mischanlagen für die Verarbeitung der Schüttkomponenten mit dem erwähnten Verhältnis der Volumenanteile der partikulären Bestandteile, einschließlich der befeuchteten Komponenten (oder mit einer ausgeprägten Tendenz zur Agglomeration) verwendet werden.

---

## **Méthode de calcul de la chaîne transporteuse à bande pour l'appareil de mélange avec une bande mobile**

**Résumé:** Est proposée la méthode de calcul de la chaîne transporteuse à bande pour l'appareil de mélange avec une bande mobile horizontale, destiné au mélange doseur des composants solides dispersés avec un rapport 1:10 et plus, compte tenu de la part des matériaux en vrac et des caractéristiques des éléments constitutifs de la chaîne transporteuse et des tambours de mélange avec les éléments à brosses. Est proposé un exemple de calcul de la chaîne transporteuse à bande. Les résultats obtenus peuvent être utilisés lors de la conception d'un nouvel équipement de mélange pour le traitement des matériaux en vrac avec un rapport indiqué des composants en vrac, y compris ceux humides (ou qui ont une forte tendance à l'agglomération).

---

**Авторы:** *Капранова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Верлока Иван Игоревич* – аспирант кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Бакин Михаил Николаевич* – младший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Яковлев Павел Андреевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

**Рецензент:** *Петерсон Станислав Антонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

---

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

**А. И. Леонтьева, Н. Н. Балабаева, К. В. Брянкин,  
Аль Фадхли Кхзаал Хамид Кхзаал,  
Аль Рубай Раафат Абдурахман Ахмет**

*Кафедра «Химия и химические технологии»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»; nach\_umu@nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова:** водонефтяная эмульсия; деэмульгаторы; дисперсность капель; ионы солей; нефтяная глобула; пластовые воды; эмульгаторы.

**Аннотация:** Приведены факторы, влияющие на формирование водонефтяных эмульсий. Отмечено, что обладая информацией об их структуре и характере защитных оболочек нефтяных глобул, можно провести процесс деэмульгации с оптимальными результатами по эффекту разделения эмульсий типа «вода в нефти».

---

### Введение

Важнейшими продуктами переработки нефти являются различные виды топлив, качество которых напрямую зависит от подготовки нефти и процесса ее переработки. Наличие воды и соли в топливе крайне недопустимо. Так как вода является растворителем и переносчиком соли к различным частям и узлам двигателя, скорость подачи которого достигает 140...160 м/с при давлении 30...160 МПа через форсунки диаметром всего 0,12...0,16 мм, даже минимальное присутствие механических примесей и солей вызывает абразивное изнашивание. Присутствие солей и воды в топливе значительно ускоряет процесс коррозии деталей (особенно в местах с повышенным температурным режимом), забивает фильтры тонкой очистки, выводит из строя топливную систему.

Добыча нефти сопровождается образованием эмульсий типа «вода в нефти» (В/Н) при изменениях давления в поровых каналах [1]. Существуют следующие особенности структуры и состава эмульсий В/Н, и на установках первичной подготовки нефти образуются «промежуточные слои» – эмульсии В/Н, содержащие 80–85 % воды. Для совершенствования технологий деэмульгирования требуется более ясное понимание процессов, протекающих в системе структуры эмульсий В/Н.

Исследования, проводимые по изучению структур эмульсий В/Н, позволят получить информацию, обеспечивающую деэмульгацию водонефтяных эмульсий с большей эффективностью разделения.

### Эксперимент, результаты и обсуждение

В процессе добычи нефти попутно извлекаются пластовая вода, механические примеси (песок, глина и т. п.) и минеральные соли в виде сложных эмульсий.

Содержание минеральных солей в нефти многих месторождений высокое, что вынуждает производителей применять многостадийные процессы их обезвоживания и обессоливания.

Например, в нефти содержание минеральных солей может составлять 700...800 мг/л, что приводит к интенсивной коррозии трубопроводов и арматуры. Кроме того, высокодисперсные и растворенные минеральные соли повышают устойчивость водонефтяных эмульсий, тем самым создают комплекс минеральных веществ, участвующих в стабилизации бронирующих оболочек нефтяных глобул. Даже при более низком содержании хлористых солей в нефти, их обезвоживание и обессоливание сопровождается значительными отклонениями от норм, установленных в технологическом регламенте [1]. Если учитывать, что при первичной подготовке и отправке на нефтеперерабатывающие заводы преимущественно смешивают нефти различных месторождений, то возникают большие потери ценного сырья и возникают расходы на его переработку.

При обессоливании водонефтяных эмульсий из них удаляют соли в виде водных растворов [2]. Важным показателем для нефтяных эмульсий является их устойчивость. Устойчивость дисперсной системы характеризуется неизменностью во времени ее основных параметров: дисперсности и равномерного распределения дисперсной фазы в среде.

Диспергирование в системе В/Н совершается за счет внешней работы. Системы не диспергирующиеся самопроизвольно называются лиофобными коллоидами. Свободная энергия системы в процессе диспергирования увеличивается, система характеризуется высокими значениями поверхностного натяжения на межфазной границе. Избыток свободной энергии делает такие системы термодинамически неустойчивыми. Для них характерны самопроизвольные процессы, снижающие этот избыток.

При рассмотрении устойчивости нефтяных эмульсий следует разграничивать два вида устойчивости: кинетическую (седиментационную) и агрегативную [3].

Для разбавленных систем кинетическая устойчивость может оцениваться как величина, обратная скорости оседания (или всплывания) частиц дисперсной фазы,

$$K_y = \frac{1}{W_r} = \frac{9\nu}{2(\rho_B - \rho_H)r^2g},$$

где  $W_r$  – скорость осаждения дисперсной фазы, м/с;  $r$  – радиус дисперсной среды, м;  $(\rho_B - \rho_H)$  – разность плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды, кг/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Чем выше вязкость дисперсионной среды, меньше разность плотностей эмульгируемых сред и радиус глобул нефти, тем выше кинетическая устойчивость эмульсий.

Таким образом, высокодисперсные системы кинетически устойчивы (для них характерно установление седиментационно-диффузионного равновесия), а грубодисперсные системы разрушаются (разделяются на нефть и воду). Глобулы дисперсной фазы при столкновении друг с другом или границей раздела фаз сливаются под действием сил молекулярного притяжения (то есть ван-дер-ваальсовых сил), образуя более крупные глобулы. Следствием потери агрегативной устойчивости является потеря седиментационной (кинетической) устойчивости. В процессе подготовки продукции нефтяных скважин к расслоению должны быть максимально снижены агрегативная и кинетическая устойчивости газоводонефтяных эмульсий. Нефтяные эмульсии обладают чрезвычайно высокой устойчивостью и могут существовать долго.

Почему же, несмотря на термодинамическую неустойчивость, нефтяные эмульсии (как и многие другие лиофобные коллоидные системы) оказываются устойчивыми кинетически, не изменяясь заметно в течение длительного времени?

Наблюдаемая долговечность таких систем свидетельствует о том, что наряду с ван-дер-ваальсовскими силами притяжения между глобулами существуют и силы отталкивания или эффекты, препятствующие притяжению. Длительное существование эмульсий обеспечивается лишь в условиях стабилизации за счет образования адсорбционно-сольватного слоя на межфазной границе [4].

Эмульгаторами нефти являются:

- 1) асфальтены;
- 2) смолы;
- 3) кристаллы парафина;
- 4) нафтеновые кислоты;
- 5) порфирины;
- 6) твердые минеральные соли, глина.

Эмульгаторы присутствуют в пластовой воде: это кислоты и соли. Все нефти образуют эмульсии, но способность их к эмульгированию различна. Чем больше в нефти содержится полярных компонентов, тем вышестойкость образующейся эмульсии: нефти парафинового основания образуют менее стойкие эмульсии, чем нефти нафтенного основания.

Чем больше минерализация воды, тем выше стойкость эмульсии [5]. Так как неустойчивость эмульсий связана прежде всего с избытком межфазной свободной энергии, то эмульгаторами должны быть вещества, снижающие поверхностное натяжение на границе раздела фаз – поверхностно-активные вещества.

В процессе перемешивания нефти с пластовой водой и образования мелких капелек нефти, частицы эмульгатора адсорбируются на поверхности этих капелек (или, как принято говорить, на поверхности раздела фаз) и образуют пленку (оболочку), препятствующую слиянию капелек при столкновении, создавая структурно-механический барьер.

Вследствие ориентации молекул и боковой когезии соседних молекул, образования водородных связей или гидрофобного взаимодействия, идет образование неполярных групп. Адсорбционные слои структурируются и обладают определенными структурно-механическими свойствами: высокой вязкостью и прочностью. Асфальтены образуют наиболее прочные пленки, а смолы – слабые пленки [6].

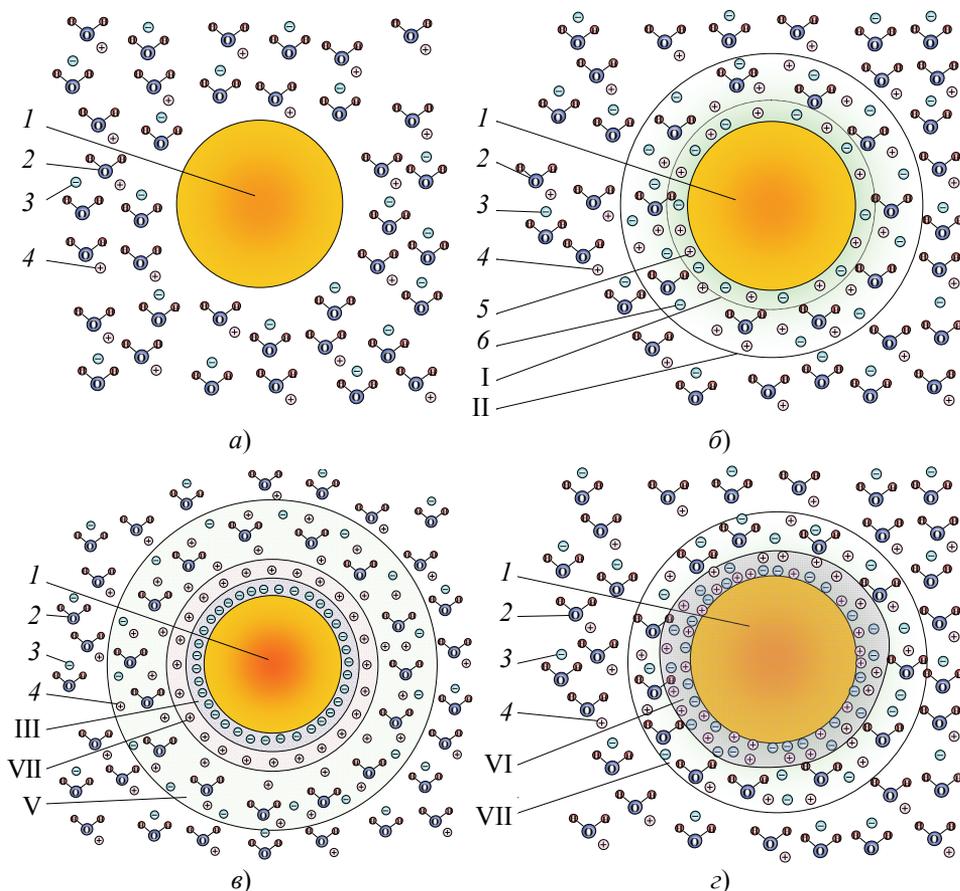
Соли, содержащиеся в водах эмульсий В/Н, могут находиться в трех состояниях [7]:

- 1) растворенные в воде;
- 2) координированные вокруг глобул нефти, сорбированные с незначительной энергией связи;
- 3) сорбированные на поверхности глобул нефти, с энергией связи, близкой к хемосорбции.

При этом может формироваться два варианта, различающиеся между собой природой связи сорбированных на поверхности глобул нефти ионов водорастворимых солей: 1) образование сорбционного слоя; 2) глобулы не сорбируют ионы водорастворимых солей на своей поверхности (рис. 1, *а*). Природа сорбционного слоя, формируемого вокруг глобул нефти, может иметь признаки двойного электрического слоя (рис. 1, *б*).

В зависимости от расположения ионов солей вокруг глобул нефти и устойчивости образованных связей глобула–ионы, возможны следующие варианты:

- 1) глобула нефти индифферентна к ионам водорастворимых примесей и молекуле воды (рис. 1 *а*);
- 2) глобула нефти образует вокруг себя адсорбционный слой из ионов солей или координирует вокруг себя молекулы воды (рис. 1, *б*), с низкой энергией связи;



**Рис. 1. Расположение ионов солей вокруг глобулы нефти:**

*a* – с отсутствием связи глобулы нефти – ионы солей; *б* – с формированием сорбционного слоя из ионов солей; *в* – с формированием двойного электрического слоя; *г* – с формированием хемосорбционного слоя; 1 – глобула нефти; 2 – молекула воды; 3, 4 – положительно и отрицательно заряженные ионы соответственно; 5, 6 – положительно и отрицательно заряженные ионы, сорбированные на поверхности глобулы нефти; I – область сорбированных на поверхности частицы ионов; II – область координированных ионов и молекул воды; III – потенциалопределяющая область, сформированная отрицательными ионами; IV – область противоионов, образуемая положительными ионами; V – диффузионная область, сформируется в основном положительно заряженными ионами; VI – область хемосорбированных ионов; VII – область координированных ионов и молекул воды

3) глобула нефти образует вокруг себя двойной электрический слой из ионов солей (рис. 1, *в*);

4) глобула нефти образует вокруг себя хемосорбционный слой из ионов солей (рис. 1, *г*).

### Выводы

Предложены модели структур эмульсий типа «вода в нефти», где рассмотрено влияние ионов солей на формирование защитных оболочек глобул нефти, которые в значительной степени влияют на процесс деэмульгации эмульсии типа «вода в нефти».

### Список литературы

1. Эксплуатация и технология разработки нефтяных и газовых скважин / И. Д. Амелин [и др.]. – М. : Недра, 1978. – 356 с.
2. Смирнов, Ю. С. Химическое деэмульгирование нефти как основа ее промысловой подготовки / Ю. С. Смирнов, Н. Т. Мелошенко // Нефтяное хозяйство. – 1989. – № 8. – С. 46.
3. Позднышев, Г. Н. Стабилизация и разрушение эмульсий / Г. Н. Позднышев. – М. : Недра, 1982. – 221 с.
4. Левченко, Д. И. Технология обессоливания нефтей на нефтеперерабатывающих предприятиях / Д. И. Левченко, Н. В. Бергштейн, Н. М. Николаева. – М. : Химия, 1985. – 168 с.
5. Логинов, В. И. Обезвоживание и обессоливание нефтей / В. И. Логинов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.
6. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Д. И. Левченко [и др.]. – М. : Химия, 1967. – 200 с.
7. ГОСТ 21534–76. Методы определения содержания хлористых солей. – Взамен ГОСТ 2401–62 и ГОСТ 10097–62 ; введ. 1977–01–01. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 17 с.

---

## The Formation of the Structure of Water-Oil Emulsions

A. I. Leontieva, N. N. Balabayeva, K. V. Bryankin,  
Al Fadhli Khazal Khamid Khazaal,  
Al Rubai Raafat Abdurahman Ahmet

*Department of Chemistry and Chemical Technologies, TSTU;  
nach\_umu@nnn.tstu.ru*

**Keywords:** demulsifiers; dispersity of drops; emulsifiers; formation waters; oil globule; salt ions; water-oil emulsion.

**Abstract:** Factors influencing the formation of water-oil emulsions are given. It is noted that information on the structure of emulsions and the nature of the initial shells of oil globules makes it possible to carry out the process of demulsification with optimal results on the effect of separation of the water-oil emulsion.

### References

1. Amelin I.D., Andriasov R.S., Gimatudinov Sh.K. [et al.] *Ekspluatatsiya i tekhnologiya razrabotki neftyanykh i gazovykh skvazhin* [Operation and technology of development of oil and gas wells], Moscow: Nedra, 1978, 356 p. (In Russ.)
2. Smirnov Yu.S., Meloshenko N.T. [Chemical demulsification of oil as a basis for its commercial preparation], *Neftyanoe Khozyaystvo* [Oil Industry], 1989, no. 8, p. 46. (In Russ.)
3. Pozdnyshv G.N. *Stabilizatsiya i razrushenie emul'sii* [Stabilization and destruction of emulsions], Moscow: Nedra, 1982, 221 p.
4. Levchenko D.N., Bergshtein N.V., Nikolaeva N.M. *Tekhnologiya obessolivaniya neftei na neftepererabatyvayushchikh predpriyatiyakh* [Technology of oil desalting in oil refineries], Moscow: Khimiya, 1985, 168 p. (In Russ.)
5. Loginov V.I. *Obezvozhivanie i obessolivanie neftei* [Dehydration and desalting of oils], Moscow: Khimiya, 1979, 216 p. (In Russ.)

6. Levchenko D.N., Bergshtein N.V., Khudyakova A.D. [et al.] *Emul'sii nefti s vodoi i metody ikh razrusheniya* [Emulsions of oil and water and methods of their destruction], Moscow: Khimiya, 1967, 200 p. (In Russ.)

7. *GOST 21534-76. Metody opredeleniya sodержaniya khloristykh solei* [Russian Interstate Standard 21534-76. Petroleum. The determination of chloride salts content], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1976, 17 p. (In Russ.)

---

## Strukturbildung der Wasser-Erdöl-Emulsionen

**Zusammenfassung:** Es sind die Faktoren angegeben, die die Bildung von Wasser-Öl-Emulsionen beeinflussen. Es ist verzeichnet, dass es mit Informationen über ihre Struktur und Art der Schutzhüllen von Ölkügelchen möglich ist, den Prozess des Demulgierens mit optimalen Ergebnissen bezüglich der Wirkung der Trennung der Wasser-Öl-Emulsionen durchzuführen.

---

## Formation de la structure des émulsions d'eau et pétrole

**Résumé:** Sont cités les facteurs qui influencent sur la formation des émulsions d'eau et pétrole. Est noté qu'avec des informations sur leur structure et la nature des enveloppes de protection des globules du pétrole, il est possible de mener le processus de désémulsion avec des résultats optimaux sur l'effet de la séparation des émulsions eau- pétrole.

---

**Авторы:** *Леонтьева Альбина Ивановна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология»; *Балабаева Нина Николаевна* – аспирант кафедры «Химия и химическая технология»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология»; *Аль Фадхли Кхзаал Хамид Кхзаал* – аспирант кафедры «Химия и химическая технология»; *Аль Рубай Раафат Абдурахман Ахмет* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета «Международное образование», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

О. А. Абоносимов<sup>1</sup>, М. А. Кузнецов<sup>1</sup>, О. А. Ковалева<sup>1</sup>,  
В. М. Поликарпов<sup>2</sup>, В. М. Дмитриев<sup>3</sup>

*Кафедры: «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1); «Физика» (2); «Безопасность и правопорядок» (3), ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; geometry@mail.nnn.tstu.ru*

**Ключевые слова:** кинетические зависимости; мембрана; разделение; электробаромембранный аппарат.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность применения электрохимического мембранного разделения растворов при очистке технологических вод от ионов тяжелых металлов. В целях изучения влияния параметров проведения процесса разделения на основные кинетические характеристики проведены экспериментальные исследования удельной производительности и коэффициента задержания мембран МГА-95 и МГА-100 при очистке технологических вод от ионов тяжелых металлов Fe(II), Cd(II), Pb(II). Разработана математическая модель кинетики массопереноса при электрохимическом мембранном разделении, используемая в методике расчета электрохимического мембранного аппарата для удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод. Предложены к использованию разработанные и модернизированные технологические схемы очистки сточных вод очистных сооружений.

---

Загрязнение окружающей среды, в том числе источников водоснабжения, является реальным фактором, который оказывает отрицательное влияние на здоровье людей. Более 90 % сточных вод, поступающих через коммунальные сети в поверхностные водные объекты, сбрасываются неочищенными. Все более жесточающиеся требования к сбросу промышленных сточных вод требуют поиска и разработки более эффективных решений в области очистки технологических и сточных вод. Один из наиболее рациональных путей для достижения этих целей – создание локальных систем очистки с извлечением ценных компонентов и использованием очищенных вод в оборотном цикле [1, 2].

Наибольшие успехи в отношении эффективности и технологичности выделения цветных металлов из сточных вод достигнуты при использовании методов мембранного разделения, в частности, обратного осмоса, ультра- и электроосмофльтрации [3, 4]. При инженерных методиках расчета процесса электрохимического разделения необходимо иметь экспериментальные данные по кинетическим параметрам массопереноса. Одними из составляющих массопереноса при электрохимическом мембранном разделении являются удельная производительность мембран и коэффициент задержания [3].

В целях исследования основных параметров электрохимического мембранного разделения проведен эксперимент по очистке сточных вод с промышленных объектов г. Тамбова, взятых на ООО РКС «Тамбовводоканал», от ионов тяжелых металлов Fe(II), Cd(II), Pb(II). Для исследования использовали лабораторную электрохимическую мембранную установку, рабочей частью которой служит плоско-камерная ячейка. Схема электрохимической мембранной установки и методика проведения эксперимента подробно рассмотрены в работе [5].

Значение удельного потока мембраны  $J$  рассчитывали по зависимости [5]

$$J = \frac{V_{\text{пер}}}{F_M \tau}, \quad (1)$$

где  $J$  – удельный поток через мембрану,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;  $V_{\text{пер}}$  – объем собранного пермеата,  $\text{м}^3$ ;  $F_M$  – площадь мембраны,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с.

Коэффициент задержания определяли по формуле

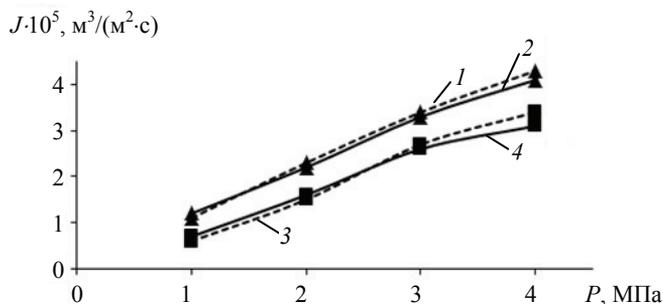
$$K = 1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{исх}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{пер}}$ ,  $C_{\text{исх}}$  – полученная концентрация растворенного вещества в пермеате и исходном растворе соответственно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

На рисунках 1 – 8 представлены зависимости удельного потока и коэффициента задержания мембран МГА-95 и МГА-100 в зависимости от давления, концентрации и плотности тока (штриховая линия – расчет, сплошная – экспериментальные данные).

Анализ зависимости удельного потока от давления (см. рис. 1) показал, что с увеличением давления возрастает величина проницаемости мембран, так как увеличивается эффективная движущая сила процесса [6]. Мембрана МГА-95 имеет большую величину удельного потока по сравнению с МГА-100, что объясняется различной пористой структурой активного слоя мембран [7].

В тех случаях, когда мембрана не изменяет своей структуры под действием давления, проницаемость воды линейно возрастает с увеличением эффективной движущей силы. Однако, при повышенных давлениях реальные полимерные мембраны не сохраняют свою первоначальную структуру и уплотняются. Начиная с некоторой величины рабочего давления, проницаемость повышается и при определенных давлениях достигает максимума. При дальнейшем увеличении давления проницаемость снижается [8].



**Рис. 1. Зависимость удельного потока растворителя через мембраны МГА-95 (1, 2) и МГА-100 (3, 4) многокомпонентного водного раствора от давления при удалении катионов:**  
 $C_{\text{исх}}$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ : Pb(II), Cd(II) – 0,20; Fe(II) – 0,15

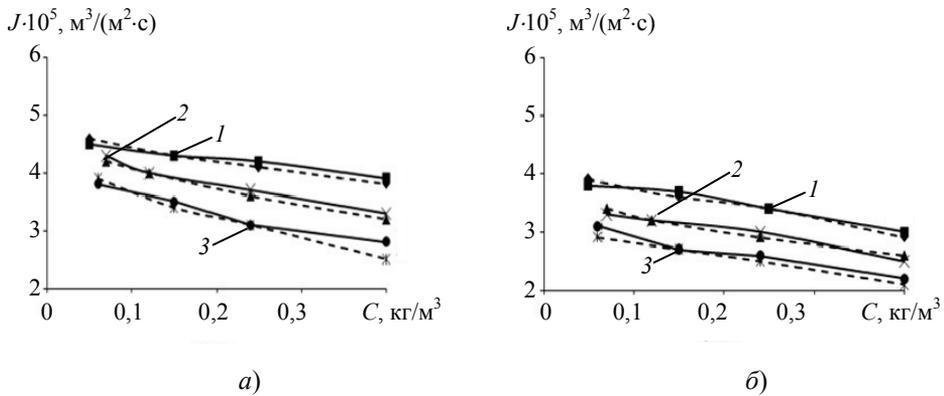


Рис. 2. Зависимость удельного потока растворителя через мембраны МГА-95 (а), МГА-100 (б) при давлении  $P = 4,0$  МПа и температуре  $T = 295$  К от концентрации раствора: 1 – Cd(II); 2 – Pb(II); 3 – Fe(II)

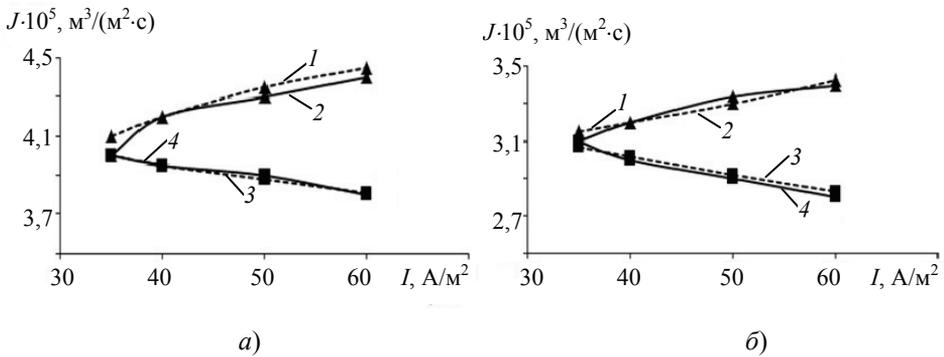


Рис. 3. Зависимости удельного потока растворителя от плотности тока при  $P = 4$  МПа многокомпонентного водного раствора для прикатодной (1, 2) и прианодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)

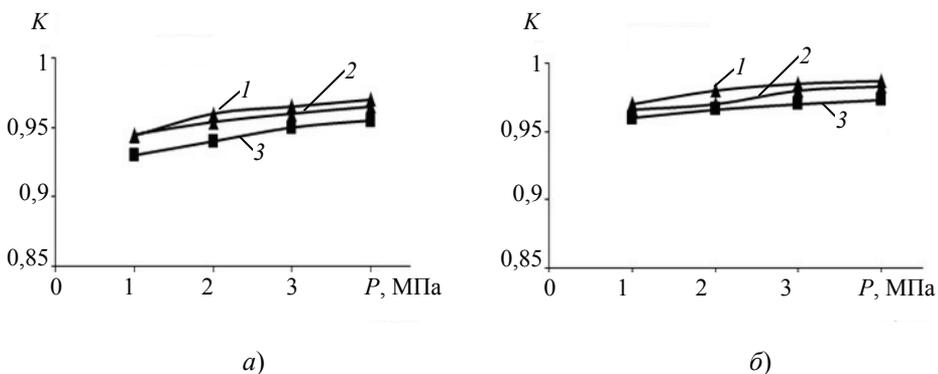


Рис. 4. Зависимости коэффициента задержания мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б) по многокомпонентному водному раствору от давления при удалении катионов: 1 – Pb(II), 2 – Cd(II), 3 – Fe(II); исходная концентрация катионов,  $\text{kg}/\text{m}^3$ : Pb – 0,22; Cd – 0,20; Fe – 0,15

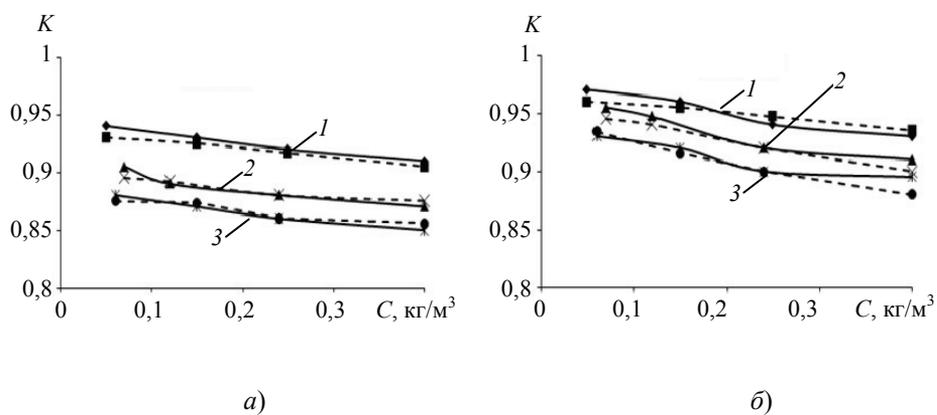


Рис. 5. Зависимости коэффициента задержания мембран МГА-95 (а), МГА100 (б) при постоянном давлении  $P = 4,0$  МПа и температуре  $T = 295$  К от концентрации раствора:  
1 – Cd(II); 2 – Pb(II); 3 – Fe(II)

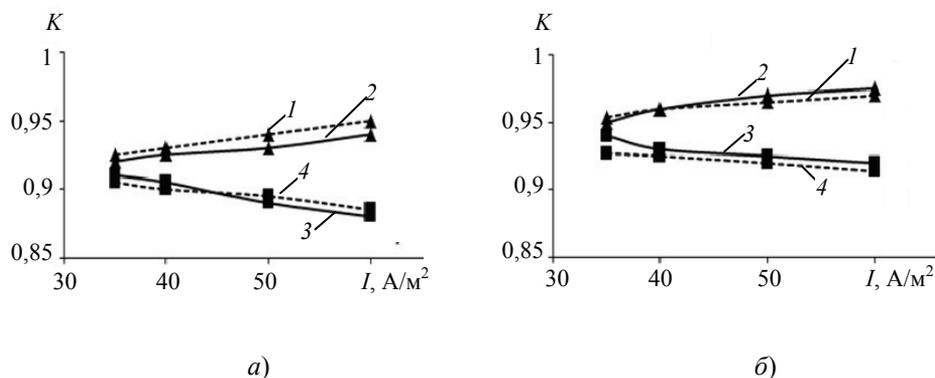


Рис. 6. Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Pb(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)

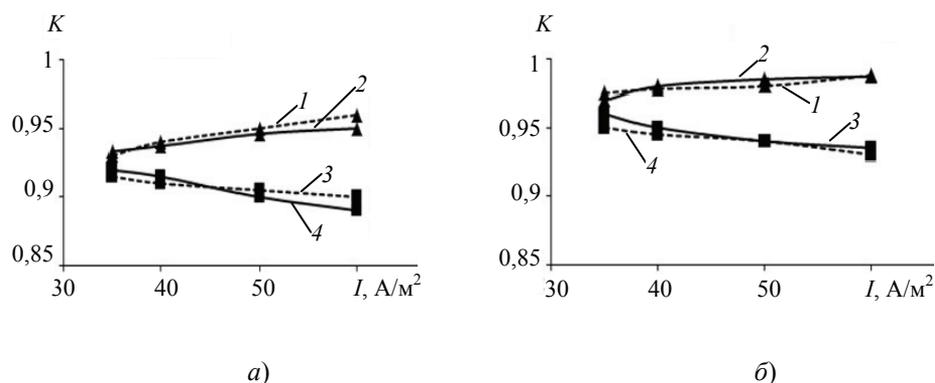
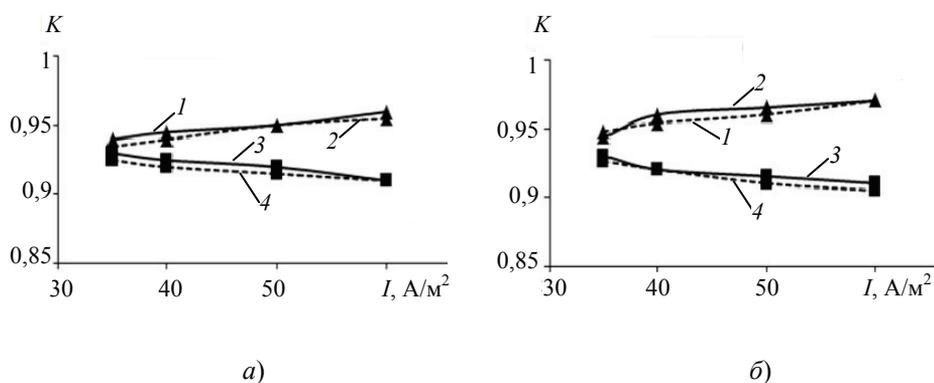


Рис. 7. Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Cd(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)



**Рис. 8. Зависимости коэффициента задержания от плотности тока при  $P = 4$  МПа катионов Fe(II) прианодной (1, 2) и прикатодной (3, 4) мембран МГА-95 (а), МГА-100 (б)**

Анализируя зависимости удельного потока от концентрации (см. рис. 2), можно заметить, что удельный поток через исследуемые мембраны незначительно уменьшается с ростом концентрации для всех веществ. По значениям концентраций исследуемых растворов их можно отнести к разбавленным. Для таких растворов характерно незначительное влияние роста концентрации на проницаемость мембран. В зависимости от типа мембран отмечается большая удельная производительность мембраны МГА-95, чем МГА-100.

Рассматривая зависимости удельного потока растворителя от плотности тока (см. рис. 3), необходимо отметить неоднозначное поведение кривых для прикатодных и прианодных мембран. Данный факт можно объяснить различными величинами групп ионов различных зарядов, влияющих на перенос воды через исследуемые мембраны.

Для теоретического расчета удельного потока растворителя предложено уравнение следующего вида [9]

$$J = k(\Delta P - (k_1 + i^m k_2)C) \exp(k_3 C^n) \exp\left(\frac{A}{T}\right), \quad (3)$$

где  $k_1$ ,  $m$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $n$ ,  $A$  – числовые коэффициенты;  $\Delta P$  – перепад трансмембранного давления, МПа;  $C$  – концентрация, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К;  $k$  – коэффициент водопроницаемости мембраны, м/(с·МПа);  $i$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>.

В таблице 1 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (3).

Анализируя зависимости коэффициента задержания от градиента давления (см. рис. 4), можно отметить увеличение коэффициента задержания с ростом давления, так как увеличивается усилие на активный слой мембраны, которая в результате деформации уплотняется [10, 11].

Анализ зависимостей (см. рис. 5), показал, что с ростом концентрации растворов для всех исследуемых веществ коэффициенты задержания незначительно уменьшаются, что характерно для электрохимического мембранного разделения разбавленных растворов.

Коэффициент задержания также находится в линейной зависимости от плотности тока (см. рис. 6 – 8), однако отмечается различное поведение кривых коэффициента задержания для прианодных и прикатодных мембран. Данное явление вызвано «блокировкой» пор прикатодных мембран за счет отвода основной группы ионов [12].

Таблица 1

**Значения эмпирических коэффициентов уравнения (3)**

Мембрана	$k_1$	$m$	$k_2$	$k_3$	$n$	$A$
МГА-95 (прианодная)	-0,94	0,51	0,10	6,54	1,00	6,54
МГА-95 (прикатодная)	0,14	0,75	-0,04	6,54	1,00	6,54
МГА-100 (прианодная)	0,73	-0,20	4,29	7,16	4,72	4,74
МГА-100 (прикатодная)	7,30	-0,82	8,64	5,48	1,00	5,48

Для теоретического расчета коэффициента задержания с наложением электрического тока получено выражение следующего вида [13]

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{k_1 k_p} - 1 \right) \left[ 1 - \exp\left( -\frac{k_2 J k_p i \eta}{D k_p i \eta} \right) \right] \exp(-k_3 J)} \quad (4)$$

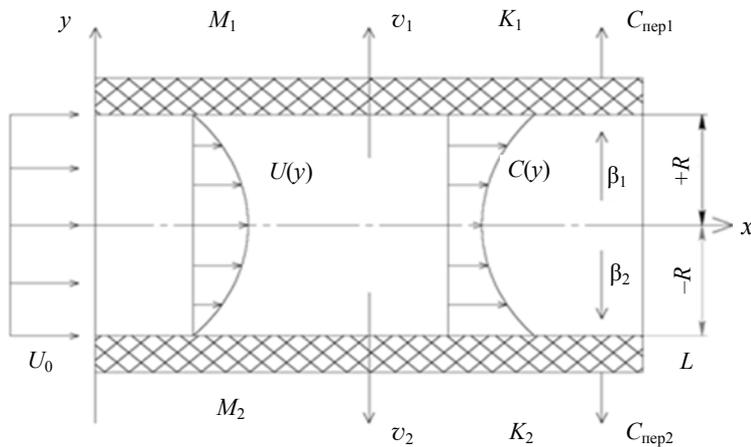
где  $k_1, k_2, k_3$  – эмпирические коэффициенты;  $\eta$  – выход по току;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

В таблице 2 представлены значения эмпирических коэффициентов для уравнения (4).

Таблица 2

**Значения эмпирических коэффициентов уравнения (4)**

Раствор	Мембрана	$k_1$	$k_2$	$k_3$
Pb(II)	МГА-95 (прианодная)	0,31	1,28	1,06
	МГА-95 (прикатодная)	0,23	1,25	1,01
	МГА-100 (прианодная)	2,32	0,51	11,42
	МГА-100 (прикатодная)	2,22	0,25	10,27
Cd(II)	МГА-95 (прианодная)	0,49	1,25	1,00
	МГА-95 (прикатодная)	0,43	1,68	1,34
	МГА-100 (прианодная)	1,82	0,38	11,20
	МГА-100 (прикатодная)	1,93	0,31	9,19
Fe(II)	МГА-95 (прианодная)	0,054	1,012	32,14
	МГА-95 (прикатодная)	0,082	1,008	27,70
	МГА-100 (прианодная)	4,12	0,24	1,08
	МГА-100 (прикатодная)	6,23	0,15	1,28



**Рис. 9. Схема разделения раствора в межмембранном канале электрохимического мембранного аппарата:**

$M_1, M_2$  – обратноосмотические мембраны;  $L$  – длина межмембранного канала, м;  $R$  – полувысота межмембранного канала, м;  $C_{пер1}, C_{пер2}$  – концентрация разделяемого раствора и пермеата соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $U_0$  – скорость потока раствора, м/с;  $v_1, v_2$  – скорости потока пермеата, м/с;  $\beta_1, \beta_2$  – коэффициенты массоотдачи от раствора к мембране, м<sup>2</sup>/с;  $K_1, K_2$  – коэффициенты задержания мембран

Сравнение экспериментальных и расчетных значений коэффициента задержания показало их удовлетворительное совпадение. Для математического описания массопереноса в электрохимических мембранных аппаратах разработана математическая модель, основанная на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнении конвективной диффузии в канале. Схема разделения раствора в межмембранном канале электрохимического мембранного аппарата представлена на рис. 9.

В модели приняты следующие допущения: диффузионное сопротивление со стороны пермеата незначительно; стенки межмембранного канала плоскопараллельны; режим течения жидкости ламинарный  $Re < 2300$ ; насос обеспечивает постоянный расход раствора.

Математическая запись модели массопереноса в обратноосмотических аппаратах:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}; \quad (6)$$

$$U \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость раствора, м<sup>2</sup>/с.

Начальные и граничные условия:

$$C(0, y) = C_{исх}; \quad (8)$$

$$U(x, R/2) = 0; \quad U(x, 0) = 0; \quad (9)$$

$$K_1 C(x, R/2) v(x, R/2) = D \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}; \quad K_2 C(x, 0) v(x, 0) = D \frac{\partial C(x, 0)}{\partial y}, \quad (10)$$

где  $K_1(x)$ ,  $K_2(x)$  – коэффициенты задержания для обратноосмотических мембран, которые определяют по формуле

$$K(x) = 1 - \frac{C_{\text{пер}}(x)}{C(x, b/2)}; \quad (11)$$

$C(x, R/2)$  – концентрация растворенного вещества у поверхности мембран со стороны канала; для рассматриваемого обратноосмотического аппарата задача симметрична, то есть  $K_1(x) = K_2(x)$ , вследствие того, что мембраны одинаковы.

Выражение для продольной скорости раствора, получаемое из уравнения движения жидкости в межмембранном канале, имеет следующий вид [14]

$$U(x, R/2) = -\frac{1}{2\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \right) \left( (R/2)^2 - y^2 \right). \quad (12)$$

Скорость фильтрации, полученная из уравнения проницаемости, имеет следующий вид

$$v = K \Delta P_{\text{H}} - \frac{\text{sh}(\sqrt{\lambda}(L-x)) + \text{ash}(x\sqrt{\lambda})}{\text{sh}(L\sqrt{\lambda})}, \quad (13)$$

где  $\lambda = -\frac{3\mu k}{(R/2)^3}$ ;  $a = \frac{\Delta P_{\text{K}}}{\Delta P_{\text{H}}}$ ;  $\Delta P_{\text{H}}$ ,  $\Delta P_{\text{K}}$  – начальный и конечный перепады трансмембранного давления соответственно, МПа.

Выражение для перепада давления по длине канала имеет следующий вид

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{\Delta P_{\text{H}} \sqrt{\lambda}}{\text{sh}(L\sqrt{\lambda})} \left[ \text{ch}(\sqrt{\lambda}(L-x)) - \text{ach}(x\sqrt{\lambda}) \right]. \quad (14)$$

Используя уравнения (12) – (14) в уравнении конвективной диффузии (7), получаем конечную задачу

$$f_1(x) \left( (R/2)^2 - y^2 \right) \frac{\partial C}{\partial x} + f_2(x) \frac{\partial C}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (15)$$

граничные условия:

$$C(x, R/2) f_2(x) = m \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}; \quad (16)$$

$$\frac{\partial C(x, 0)}{\partial y} = 0; \quad (17)$$

$$C_0(0, y) = C_0, \quad (18)$$

где

$$f_1(x) = \frac{\sqrt{|\lambda|}}{2\mu} [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) - \operatorname{ach}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (19)$$

$$f_2(x) = K [\operatorname{ch}(\sqrt{|\lambda|}(L-x)) + \operatorname{ach}(x\sqrt{|\lambda|})]; \quad (20)$$

$$\varepsilon = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{\Delta P_K}; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{D \operatorname{sh}(L\sqrt{|\lambda|})}{K \Delta P_H}. \quad (22)$$

Полученная система уравнений (15) – (18) решается методом конечных разностей с нахождением поля концентраций  $C(x, y)$ . Для решения была составлена программа счета (на языке Delphi), реализованная на персональном компьютере. Зная поле концентраций  $C(x, y)$  можно рассчитать локальные эффективные коэффициенты массоотдачи по длине канала по уравнению

$$\beta = \frac{D \frac{\partial C(x, R/2)}{\partial y}}{C(x, R/2) - \tilde{C}(x)}, \quad (23)$$

где  $\tilde{C}(x)$  – средняя по сечению концентрация раствора в межмембранном канале,  $\text{кг/м}^3$ ,

$$\tilde{C}(x) = \frac{1}{b \tilde{U}} \int C(x, y) U(y) dy, \quad (24)$$

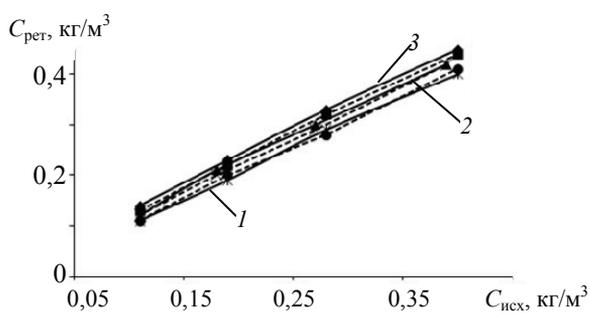
где  $\tilde{U}$  – средняя скорость потока жидкости в межмембранном канале,  $\text{м/с}$ ,

$$\tilde{U} = \frac{1}{b} \int U(x, y) dy. \quad (25)$$

Проверку адекватности разработанной математической модели осуществляли путем сравнения экспериментальных данных и расчетных значений. Разработанная математическая модель в процессе счета позволяет получить среднее значение концентрации на выходе из элемента и величины локальных эффективных коэффициентов массоотдачи по длине межмембранного канала.

Сравнение проводилось по концентрационным зависимостям ретентата от концентрации исходного раствора при различных скоростях потока раствора в межмембранном канале. При проверке использовали экспериментальные данные, полученные при разделении модельных растворов сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов Fe(II), Cd(II), Pb(II):  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{CdSO}_4$ ,  $\text{Pb(NO}_3)_2$  на лабораторной электрохимической мембранной установке с мембраной МГА-95.

Эксперименты проводились на однокомпонентных растворах при различном трансмембранном давлении растворов. Результаты экспериментов и расчетных данных представлены зависимостями концентраций ретентата от концентрации исходного раствора при различном трансмембранном давлении (рис. 10). Совпадение расчетных и экспериментальных величин не превышает 15 %, что свидетельствует о приемлемой адекватности разработанной математической модели реальным процессам массопереноса в электрохимических мембранных аппаратах.



**Рис. 10. Сравнение расчетных (пунктирные линии) и экспериментальных (сплошные линии) концентрационных зависимостей от давления  $P$ , МПа, при температуре  $T = 293$  К для раствора Fe(II):**  
 $1 - 2,0$ ;  $2 - 3,0$ ;  $3 - 4,0$

Представленная математическая модель применялась для разработки инженерной методики расчета как электрохимических, так и обратноосмотических установок. Для инженерных расчетов предельную плотность тока оценивали по следующему уравнению

$$i_{\text{пр}} = \frac{FDC_{\text{исх}}}{(\bar{i} - t)d_{\text{экв}}} k \text{Re}^n \text{Pr}^m, \quad (26)$$

где  $\text{Re}$  – критерий Рейнольдса;  $\text{Pr}$  – критерий Прандтля;  $F$  – число Фарадея;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация раствора,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\bar{i}, t$  – числа переноса в мембране и растворе соответственно;  $d_{\text{экв}}$  – характерный размер, м;  $m, n$  – экспериментальные постоянные.

Площадь мембраны определяли, используя основное уравнение массопередачи

$$F_M = M / \Delta P k. \quad (27)$$

Коэффициент массопередачи найдем по следующему выражению

$$k = \left( \frac{1}{\beta} + \frac{\delta}{P_d} \right)^{-1}, \quad (28)$$

где  $\delta$  – толщина мембраны, м;  $P_d$  – диффузионная проницаемость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Оценив рабочую площадь одного разделяющего элемента и при условии, что аппарат включает в себя два элемента, рассчитаем общее число аппаратов в мембранной установке

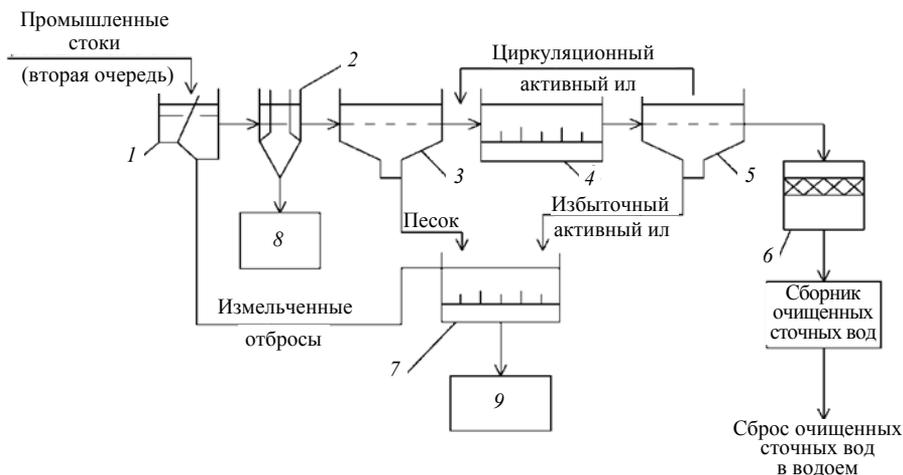
$$n = F / 2F_3. \quad (29)$$

Экономическую эффективность электрохимической мембранной установки находили через общий расход энергии, необходимый для ведения процесса разделения по следующей формуле

$$W_3 = V_{\text{р.р}} P / K_{\text{КПД}}, \quad (30)$$

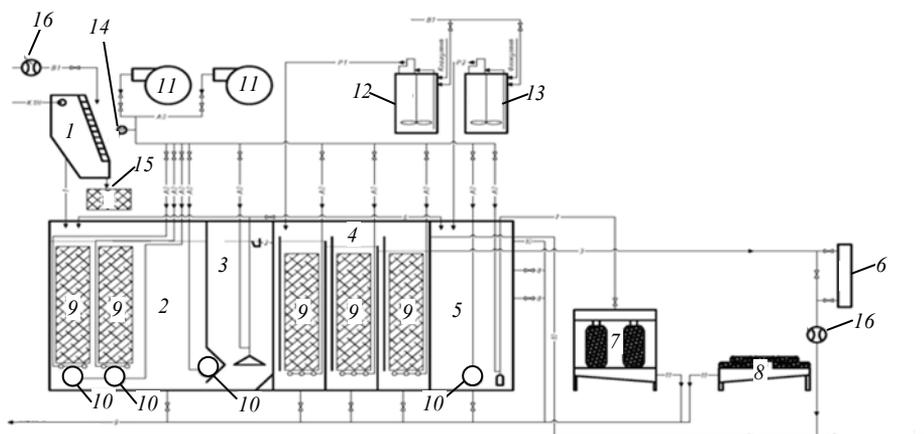
где  $V_{\text{р.р}}$  – объем разделяемого раствора,  $\text{м}^3$ ;  $P$  – рабочее давление, МПа.

Сравнение с другими методами разделения, например, дистилляцией, показывает, что затраты энергии при мембранном разделении в 10 – 15 раз меньше. Предложенная на основе математической модели массопереноса инженерная методика расчета может использоваться при технологическом расчете электрохимических мембранных аппаратов, применяемых в процессах разделения сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов Fe(II), Cd(II) и Pb(II).



**Рис. 11. Модернизированная схема очистных сооружений  
ОАО «РКС Тамбовводоканал»:**

1 – решетки; 2 – горизонтальные песколовки с круговым движением воды;  
3 – первичный радиальный отстойник; 4 – аэротенк-вытеснитель с естественной аэрацией; 5 – вторичный радиальный отстойник; 6 – промышленная электрохимическая мембранная установка; 7 – аэробный стабилизатор; 8 – песковые площадки;  
9 – иловые площадки



**Рис. 12. Модернизированная технологическая схема КОС-50:**

1 – самоочищающаяся решетка (СОР); 2 – биореактор; 3 – вторичный отстойник;  
4 – биореактор доочистки; 5 – аэробный илоуплотнитель-стабилизатор; 6 – электробаромембранный аппарат; 7 – мешковый обезвоживатель; 8 – поддон для мешков; 9 – кассета с синтетической загрузкой; 10 – аэратор мелкопузырчатый; 11 – воздушовулка; 12 – узел приготовления и дозации раствора коагулянта; 13 – узел приготовления и дозации раствора флокулянта; 14 – манометр; 15 – лоток для сбора кека; 16 – расходомер

На основе проведенных исследований по электрохимическому мембранному разделению промышленных сточных вод, отобранных на очистных сооружениях Тамбовводоканал филиала ОАО «Тамбовские коммунальные системы» (г. Тамбов), сделаны выводы о возможности применения метода электрохимического разделения и модернизации существующей технологической схемы с внедрением в нее стадии мембранного разделения. Результаты проведенных исследований и модернизированная технологическая схема (рис. 11) очистки промышленных сточных вод предложены ОАО «РКС Тамбовводоканал» (г. Тамбов) для проектирования очистных сооружений с использованием выпускаемого отечественного мембранного оборудования.

В результате исследований по электрохимическому мембранному разделению сточных вод предложено модернизировать технологическую схему канализационных очистных сооружений КОС-50, принципиальным отличием которой является замена установки ультрафиолетового обеззараживания электробаромембранным аппаратом (рис. 12). Отмечено, что с помощью наложения электрического поля можно эффективно управлять процессом электрохимического мембранного разделения исследуемых технологических растворов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственного задания № 1222.*

#### *Список литературы*

1. Родионов, А. И. Технологические процессы экологической безопасности / А. И. Родионов, В. Н. Клущин, В. Г. Систер. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
2. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А. М. Когановский [и др.]. – М.: Химия, 2005. – 288 с.
3. Шапошник, В. А. История мембранной науки. Ч. 2. Баромембранные и электромембранные процессы / В. А. Шапошник // Крит. технологии. Мембраны. – 2001. – № 10. – С. 9 – 17.
4. Removal of Arsenic and Pesticides from Drinking Water by Nanofiltration Membranes. Sep Purification Technol / K. Kosutic [et al.] // Separation and Purification Technology. – 2005. – Vol. 42, No. 2. – P. 137 – 144.
5. Кинетика электробаромембранного разделения водных сульфатосодержащих растворов / С. И. Лазарев [и др.] // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 29 – 34.
6. Дубяга, В. П. Нанотехнологии и мембраны / В. П. Дубяга, И. Б. Бесфамильный // Крит. технологии. Мембраны. – 2005. – № 3. – С. 11 – 16.
7. Дытнерский, Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей: учебное пособие / Ю. И. Дытнерский // – М.: Химия, 1995. – 232 с.
8. Лазарев, К. С. Исследование кинетических коэффициентов обратно-осмотического разделения растворов на мембранах МГА-95, МГА-100, ОПМ-К / К. С. Лазарев, С. В. Ковалев, А. А. Арзамасцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 3. – С. 726 – 734.
9. Лазарев, С. И. Теоретические и прикладные основы электробаромембранных методов разделения многокомпонентных растворов: учебное пособие / С. И. Лазарев. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – 104 с.

10. Шапошник, В. А. Мембранная электрохимия / В. А. Шапошник // Смазочно-охлаждающая жидкость. – 2002. – № 8. – С. 38 – 42.

11. Акулинчев, А. М. Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Ca, Fe / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 1. – С. 120 – 128.

12. Березина, Н. П. Модельное описание электротранспорта воды в ионообменных мембранах / Н. П. Березина, Н. П. Гнусин, О. А. Дёмина // Электрохимия. – 1990. – Т. 26, № 9. – С. 1098 – 1104.

13. Хорохорина, И. В. Кинетика и структурные характеристики мембран электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. наук (12.12.2014) / И. В. Хорохорина; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – 130 с.

14. Лойцянский, Н. Г. Механика жидкости и газа / Н. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

---

## Kinetic Dependencies and Technological Effectiveness of Electrochemical Membrane Separation of Sewage Waters at Enterprises

O. A. Abonosimov<sup>1</sup>, M. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, O. A. Kovaleva<sup>1</sup>,  
V. M. Polikarpov<sup>2</sup>, V. M. Dmitriev<sup>3</sup>

*Department of Applied Geometry and Computer Graphics (1); Department of Physics (2);  
Department of Security and Law (3), TSTU, Tambov, Russia;  
geometry@mail.nnn.tstu.ru*

**Keywords:** kinetic dependencies; membrane; separation; electric baromembrane apparatus.

**Abstract:** The possibility of using electrochemical membrane separation of solutions during the purification of wastewaters from heavy metal ions is considered. In order to study the influence of the parameters of the separation process on the main kinetic characteristics, the experimental studies of the specific productivity and retention factor of the MGA-95 and MGA-100 membranes were carried out for the treatment of process waters from heavy metal ions Fe(II), Cd(II), Pb(II). A mathematical model of the kinetics of mass transfer during electrochemical membrane separation has been developed. It is used in the calculation procedure of an electrochemical membrane apparatus for removing heavy-metal ions from sewage. The designed and modernized process schemes for wastewater treatment are proposed.

### References

1. Rodionov A.I., Klushnn V.N., Sister V.G. *Tekhnologicheskie protsessy ekologicheskoi bezopasnosti* [Technological processes of ecological safety], Kaluga: izd-vo N. Bochkarevoi, 2000, 800 p. (In Russ.)

2. Koganovskii A.M., Klimenko A.N., Levchenko T.M., Roda I.G. *Ochistka i ispol'zovanie stochnykh vod v promyshlennom vodosnabzhenii* [Wastewater treatment and use in industrial water supply], Moscow: Khimiya, 2005, 288 p. (In Russ.)

3. Shaposhnik V.A. [History of membrane science. part 2. baromembrane and electromembrane processes], *Kriticheskie tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2001, no. 10, pp. 9-17. (In Russ.)

4. Kosutic K., Furac L., Sipos L., Kunst B. Removal of Arsenic and Pesticides from Drinking Water by Nanofiltration Membranes, *Separation and Purification Technology*, 2005, vol. 42, no. 2, pp. 137-144.

5. Lazarev S.I., Gorbachev A.S., Kormil'tsin G.S., Abonosimov O.A. [Kinetics of electrobarromembrane separation of aqueous sulfate-containing solutions], *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed Media and Interface Boundaries], 2008, vol. 10, no. 1, pp. 29-34. (In Russ.)

6. Dubyaga, V.P., Besfamil'nyi I. B. Nanotechnologies and membranes, *Kriticheskie tekhnologii. Membrany* [Critical Technologies. Membranes], 2005, no. 3, pp. 11-16. (In Russ.)

7. Dytner'skii Yu.I. *Membrannyye protsessy razdeleniya zhidkikh smesey: uchebnoe posobie* [Membrane processes of separation of liquid mixtures. Textbook], Moscow: Khimiya, 1995, 232 p. (In Russ.)

8. Lazarev K.S., Kovalev S.V., Arzamastsev A.A. [Study of the Kinetic Coefficients of Reverse-Osmotic Separation of Solutions on Membranes MGA-95, MGA-100, OPM-K], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 726-734. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Lazarev S.I. [Theoretical and Applied Fundamentals of Electrobarome-Brane Methods for Separation of Multicomponent Solutions. Textbook], *Transactions of the Tambov State Technical University*, Tambov: 2008, 104 p. (In Russ.)

10. Shaposhnik V.A. [Membrane Electrochemistry], *Smazochno-okhlazhdayushchaya zhidkost'* [Lubricating-cooling Liquid], 2002, no. 8, pp. 38-42. (In Russ.)

11. Akulinchev A.M., Abonosimov O.A., Lazarev S.I. [Investigation of the Electrobarromembrane Separation of Industrial Process Solutions Containing Heavy Metal Ions Pb, Ca, Fe], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 120-128. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Berezina N.P., Gnusin N.P., Demina O.A. [Model description of electric water transport in ion-exchange membranes], *Elektrokimiya* [Electrochemistry], 1990, vol. 26, no. 9, pp. 1098-1104. (In Russ.)

13. Khorokhorina I.V. *Kinetika i strukturnyye kharakteristiki membran elektrolit'nykh i trafil'tratsionnoi ochistki promyshlennykh rastvorov ot anionnykh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Kinetics and structural characteristics of membranes of electro-ultrafiltration purification of industrial solutions from anionic surfactants: the author's abstract of dissertations for the academic degree of candidate of technical sciences], Tambov, 2014, 130 p. (In Russ.)

14. Loitsyanskii N.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Moscow: Nauka, 1987, 840 p. (In Russ.)

---

## **Kinetische Abhängigkeiten und technologische Effizienz der elektrochemischen Membrantrennung der Abwasserentsorgungsanlagen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit der Anwendung der elektrochemischen Membrantrennung der Lösungen bei der Reinigung technologischer Abwässer von Schwermetallionen betrachtet. Um die Wirkung der Parameter des Trennprozesses auf die kinetischen Haupteigenschaften zu untersuchen, sind experimentelle Studien spezifischer Leistung und Studien des Koeffizienten der Membranretention MGA-95 und MGA-100 bei der Reinigung technologischer Abwässer von Schwermetallionen Fe(II), Cd(II), Pb(II). durchgeführt. Es ist ein mathematisches Modell der Massentransferkinetik bei der elektrochemischen Membrantrennung ausgearbeitet, das in dem Verfahren der Berechnung der elektrochemischen Membranvorrichtung für Entfernung der Schwermetallionen aus Abwasser benutzt wird. Es sind die entwickelten und modernisierten technologischen Schemas der Abwasserreinigung durch Kläranlagen zur Verwendung. vorgeschlagen.

## **Dépendances cinétiques et efficacité technologique de la séparation électrochimique de membrane des entreprises de rectification des eaux usées**

**Résumé:** Est considérée la possibilité de l'application de la séparation électrochimique de membrane des solutions lors de la rectification des eaux technologiques des ions de métaux lourds. Afin d'étudier l'influence des paramètres de la réalisation du processus de la séparation suivant les caractéristiques cinétiques principales sont effectuées les études expérimentales de la productivité spécifique et du coefficient de la détention des membranes AR-95 et AR-100 lors de la rectification des eaux technologiques des ions de métaux lourds Fe(II), Cd(II), Pb(II). Est élaboré un modèle mathématique de la cinétique du transfert de masse lors de la séparation électrochimique de membrane utilisé dans la méthode de calcul de l'appareil électrochimique de membrane pour l'élimination des ions des métaux lourds à partir des eaux usées. Sont proposés des schémas technologiques conçus et modernisés pour le traitement des eaux usées des installations d'épuration.

---

**Авторы:** *Абоносимов Олег Аркадьевич* – доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Ковалева Ольга Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Экономика»; *Поликарпов Валерий Михайлович* – доктор химических наук, профессор кафедры «Физика»; *Дмитриев Вячеслав Михайлович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность и правопорядок», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ЗЕРНОВОГО СЫРЬЯ ДЛЯ БИОКОНВЕРСИИ С ПОВЫШЕННОЙ ЭКСТРАКТИВНОСТЬЮ

О. О. Иванов<sup>1</sup>, Е. А. Парфенова<sup>2</sup>, В. Н. Долгунин<sup>2</sup>

*Администрация Тамбовской области (1); кафедра «Технологии  
и оборудование пищевых и химических производств»;  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия (2);  
iooc4@mail.ru*

**Ключевые слова:** зерновое сырье; миграция; пивоваренный ячмень; сегрегация; сепарация по массе; управляемый сегрегированный поток; экстрактивность.

**Аннотация:** Рассмотрен принцип управления сегрегированными технологическими потоками сыпучих материалов, который использован для организации процесса сепарации зерна ячменя одновременно по размеру и плотности. Установлено, что реализация принципа на технической базе аппарата с вращающимся барабаном позволяет выделить зерновую фракцию с наибольшей массой зерна, которая характеризуется высокими физиологическими и экстрактивными свойствами. Отмечено, что экстрактивность зерна выделенной фракции более чем на 20 % превышает экстрактивность зерна в исходном сырье.

---

Качество пищевых продуктов во многом определяется качеством исходного сырья. В полной мере указанная корреляция имеет место и в производстве пива, классическим сырьем для которого является ячменный солод. В свою очередь, качество солода, получаемого на солодорастильных установках, напрямую зависит от свойств зерна, поступающего на сололожение [1, 2]. Среди множества показателей качества пивоваренного ячменя первостепенное технологическое значение имеют способность к прорастанию, энергия прорастания и экстрактивность. Первые два показателя принципиально определяют физиологические возможности зерна к участию в процессе сололожения. Экстрактивность же является показателем, оценивающим содержание в зерне совокупности веществ, которые могут быть использованы в процессе пивоварения, и определяется как массовая доля веществ (крахмала, некрахмальных полисахаридов и ряда веществ белковой природы) в зерне, способных раствориться и в процессе затирания перейти в сусло. Среди растворимых веществ зерна основной вклад в показатель его экстрактивности вносит крахмал. Например, в пивоваренном двухрядном ячмене содержание крахмала достигает 70 % при экстрактивности 73...80 % в расчете на сухое вещество [3]. Установлено, что чем больше в зерне белка, тем меньше зерно содержит крахмала и, соответственно, тем ниже его экстрактивность [3].

Статистические исследования [4] свидетельствуют о низком качестве отечественного пивоваренного ячменя. При обследовании 1,69 млн т пивоваренного ячменя, произведенного в 2016 г. в восьми субъектах Российской Федерации, выявлено, что первому классу качества соответствует только 11,8 %, второму классу –

28,2 % и около 60 % зерна признано не соответствующим государственному стандарту. Такая ситуация объясняется неблагоприятными климатическими условиями для производства качественного зернового сырья в большинстве субъектов федерации, которые приводят к избыточному накоплению в зерне белка при дефиците содержания крахмала и, как следствие, к низкой его экстрактивности.

В пивоваренных производствах остро ощущается нехватка качественного зернового сырья [4]. В настоящее время для решения проблемы разрабатываются различные способы обработки низкокачественного зернового сырья, позволяющие компенсировать дефицит его технологических свойств. Для обеспечения возможности использования солода с низкой экстрактивностью в пивоваренном производстве предложено подвергать экструзионной обработке часть ячменя в количестве 15...20 % от общей массы зернопродуктов [5]. Экструзионная обработка ячменя способствует интенсификации осахаривания сырья в процессе затирания и приводит к обогащению сусла аминным азотом и сбраживаемыми углеводами.

Для повышения экстрактивности солода в работе [6] предложена его электромагнитная обработка в низкочастотном диапазоне электромагнитного излучения 3...30 Гц. Такое воздействие позволяет увеличить выход на стадии приготовления сусла, сопровождающийся уменьшением содержания в нем общего азота, который вызывает белковое помутнение пива. Результаты исследования, приведенные в работе [7], указывают на целесообразность получения бактериологически чистого солода с повышенной экстрактивностью путем организации процесса соложения зерна, замоченного в водном растворе экстракта дуба.

Исследования, выполненные в работах [8, 9], свидетельствуют о том, что экстрактивность пивоваренного ячменя зависит не только от его сортовой принадлежности и условий произрастания, но и комплекса физико-механических свойств фракций зернового вороха, различающихся по размеру, плотности и массе зерна. Установлено, что технологические свойства пивоваренного ячменя улучшаются с увеличением размера его зерна и в первую очередь за счет более высокой экстрактивности крупных зерен, которая может превышать экстрактивность мелкой фракции на 6 % и более, что свидетельствует о возможности повышения выхода и качества готового продукта с увеличением размера зерен ячменя [8].

В работе [9], посвященной анализу продуктивности и качества сортов пивоваренного солода, отмечено, что одним из наиболее важных показателей качества такого рода сырья является масса 1000 зерен. Большая масса зерна при равном размере свидетельствует о значительном запасе в нем питательных веществ и высоком потенциале физиологической активности. Поскольку большую часть зерна занимает эндосперм, то вполне правомерно ожидать, что у зерна с большей массой экстрактивность будет выше и, соответственно, такое зерно будет обладать лучшими технологическими свойствами. Лучшие сорта пивоваренного ячменя имеют массу 1000 зерен, равную 40...47 г [10].

Результаты исследований [8, 9] свидетельствуют о целесообразности предварительного фракционирования зернового сырья пивоваренного производства одновременно по размеру и плотности в целях выделения фракции с наибольшей массой 1000 зерен. Необходимость одновременного фракционирования зернистого материала по размеру и плотности объясняется тем, что при последовательной организации фракционирования: сначала по размеру, а затем по плотности процесс будет сопровождаться, по крайней мере, двумя негативными факторами. *Во-первых*, это приведет к снижению выхода целевой фракции; *во-вторых*, двухстадийный режим фракционирования станет причиной излишнего травмирования зерна, которое будет сопровождаться потерей зерном ряда ценных физиологических свойств (всхожести, силы роста, энергии прорастания).

Однако возможности организации процесса фракционирования зерна одновременно по размеру и плотности в условиях минимального его травмирования чрезвычайно ограничены, о чем свидетельствует анализ состояния развития отечественной аграрной науки и техники [11]. Для решения указанной технологической задачи используем принцип управления сегрегированными потоками [12, 13], которые являются следствием взаимодействия неоднородных (по размеру, плотности, шероховатости, упругости, форме) частиц в технологических потоках. Динамическое взаимодействие таких частиц сопровождается эффектами разделения, которые в зависимости от физической природы разделяют на эффекты сегрегации и миграции [13]. Названные эффекты проявляются в технологических потоках параллельно, но в зависимости от структурных кинематических характеристик потоков возможно доминирование одного эффекта над другим.

Сегрегация является следствием гидромеханического взаимодействия частиц в условиях локальной неоднородности среды, когда контрольная частица вследствие своих свойств, отличающих ее от среднестатистической частицы потока, становится концентратором напряжений и получает от окружающих ее частиц импульсы, направление которых либо совпадает, либо противоположно направлению гравитации. Эффекты сегрегации доминируют в потоках с относительно высокой концентрацией частиц (порозность  $<0,75$ ) и высокой однородностью объемного распределения.

Миграция обусловлена взаимным квазидиффузионным перемещением неоднородных частиц в условиях объемного распределения. При взаимных столкновениях они приобретают хаотические колебания со скоростями флуктуаций, зависящими от комплекса их физико-механических свойств. Частицы, которые при взаимных столкновениях приобретают относительно невысокие скорости флуктуаций (крупные и плотные), перемещаются в области потока с высокой концентрацией твердой фазы, где существуют условия для их колебательных перемещений с относительно малой амплитудой. Напротив, частицы, приобретающие при взаимных столкновениях относительно высокие скорости флуктуаций (мелкие и менее плотные), имеют тенденцию к перемещению в области потока с небольшой концентрацией твердой фазы, в которых существуют условия для колебательных перемещений с высокой амплитудой.

Для технологического использования эффектов сегрегации и миграции важно учесть различную степень влияния на кинетику их протекания различных физико-механических свойств взаимодействующих частиц. Установлено, что доминирующее влияние на скорость их сегрегации оказывает различие по размеру [14]. Скорость же разделения частиц вследствие эффекта миграции зависит от различия их по комплексу физико-механических свойств (в том числе плотности, шероховатости, упругости) в отсутствие доминирующего влияния их различия по размеру. Указанные кинетические особенности эффектов сегрегации и миграции свидетельствуют о возможности организации процесса фракционирования сыпучих материалов одновременно по размеру и плотности путем рационального сопряжения названных эффектов в объеме одного технологического потока.

Вследствие эффектов разделения (сегрегации и миграции) неоднородные частицы приобретают импульсы, направленные навстречу друг другу, что в результате приводит к формированию сегрегированных потоков, являющиеся частями технологического потока сыпучего материала, в которых концентрируются частицы с более высокой однородностью свойств, чем технологический поток в целом. Для достижения технологически значимых эффектов разделения частиц, различающихся по размеру и плотности, реализуется принцип управления сегрегированными потоками в целях их многократного усиления [13, 14].

Предлагаемое техническое решение задачи фракционирования зерна одновременно по размеру и плотности учитывает, что наиболее интенсивно сегрегированные потоки формируются при быстром сдвиге гравитационном течении

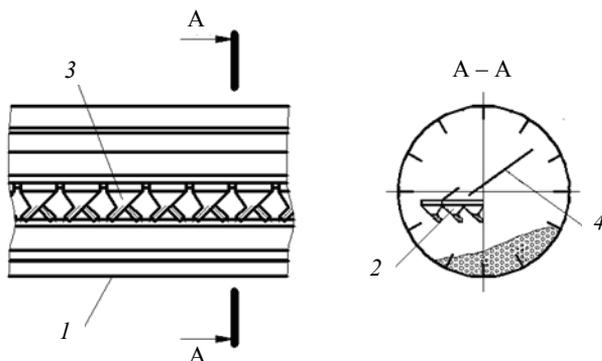
зернистых материалов на шероховатом скате. В целях реализации принципа управления сегрегированными потоками для сепарации сыпучего материала по размеру и плотности гравитационный скат размещается внутри барабана, снабженного радиальными подъемными лопастями (рис. 1).

Шероховатый скат *4* закреплен неподвижно с возможностью регулирования угла наклона в разгрузочных камерах, смонтированных по торцам барабана *1*. Под нижней кромкой ската установлен блок отклоняющих элементов, предназначенный для управления сегрегированными потоками *2* материала, которые формируются на шероховатом скате. Отклоняющие элементы *3* размещены в блоке тремя параллельными рядами и имеют противоположную продольную ориентацию в барабане. Отклоняющие элементы центрального ряда наклонены к одному из торцов барабана, а отклоняющие элементы периферийных рядов направлены в противоположную сторону. Блок установлен с возможностью поперечного перемещения в барабане и между параллельными рядами его элементов установлена поворотная заслонка для регулирования соотношения величин встречных сегрегированных потоков материала.

Такое устройство блока отклоняющих элементов обусловлено необходимостью параллельного комплексного использования эффектов сегрегации и миграции для организации процесса сепарации частиц зернистого материала одновременно по размеру и плотности. При угле наклона ската, превышающем угол естественного откоса материала, на нем образуется быстрый сдвиговый гравитационный поток, в котором частицы совершают не только поступательное перемещение в направлении сдвига, но и выполняют хаотические колебательные перемещения, обусловленные взаимным столкновением частиц.

Под действием сдвиговых деформаций и гидростатического давления в таком потоке формируются зоны с высокой и низкой концентрацией частиц. Наиболее высокая концентрация частиц относительно стабильных ее значений наблюдается в центральной части слоя, а в направлении основания и открытой поверхности потока концентрация частиц уменьшается. Низкие концентрации частиц в периферийных зонах потока являются следствием высоких скоростей деформации у основания потока и низкого гидростатического давления в области, прилегающей к открытой его поверхности.

Вследствие такого распределения концентрации частиц в потоке в его центральной зоне возникают благоприятные условия для сегрегации частиц с их разделением преимущественно по размеру. В периферийных областях потока в условиях высоких градиентов концентрации частиц формируются благоприят-



**Рис. 1.** Схема устройства для сепарации зернистого материала по массе частиц:

- 1* – барабан; *2* – насадка, управляющая сегрегированными потоками;
- 3* – отклоняющие элементы насадки; *4* – скат шероховатый

ные условия для их разделения, по квазидиффузионному механизму в соответствии с эффектом миграции. В этих условиях разделение частиц возможно по комплексу физико-механических свойств, если различие в таковых является причиной различных скоростей квазидиффузионных хаотических перемещений. Частицы, имеющие относительно небольшую скорость хаотических перемещений, например, более плотные, мигрируют в направлении центральной зоны слоя, в которой их перемещение сопровождается относительно небольшой амплитудой колебаний. Частицы же, приобретающие при взаимных столкновениях относительно высокую скорость флуктуаций, например, менее плотные, перемещаются в периферийные зоны слоя, в которых имеют возможность совершать колебания с относительно большой амплитудой. Таким образом, под действием эффектов миграции частиц в периферийных зонах слоя наиболее плотные из них мигрируют в направлении центральной зоны, в которой разделяются под действием сегрегации по размеру и наиболее крупные из них концентрируются в верхней части указанной зоны. В итоге, частицы, имеющие наиболее высокую массу, оказываются сосредоточенными в верхней части центральной зоны слоя.

Для организации процесса сепарации частиц различной массы используется принцип управления сегрегированными потоками [12, 13]. Сформированные на скате сегрегированные потоки перемещают противоточно относительно друг друга в режиме многоступенчатого взаимного контакта. Многоступенчатое противоточное перемещение сегрегированных потоков, дислоцированных в центральной и периферийных зонах гравитационного потока на скате, осуществляется отклоняющимися элементами насадки, управляющей сегрегированными потоками 2 (см. рис. 1). Насадка делит поток сыпавшихся частиц на три части согласно зонам формирования сегрегированных потоков на скате, и ее отклоняющие элементы перемещают частицы периферийных зон к одному из торцов барабана, а частицы центральной зоны – в противоположную сторону на смежные ступени сепарации. Под ступенью сепарации понимают часть аппарата, ограниченную поперечными сечениями барабана, отстоящими друг от друга на расстояние, соответствующее длине отклоняющего элемента. Частицы встречных сегрегированных потоков при переходе от ступени к ступени вступают в контакт друг с другом в режиме быстрого сдвига на скате, и под действием эффектов сегрегации и миграции каждый из потоков обогащается частицами определенного свойства. Центральный поток обогащается частицами с наибольшей массой, а в периферийных потоках увеличивается концентрация мелких и менее плотных частиц. Частицы сепарируемого материала распределяются вдоль барабана в зависимости от их массы. Масса частиц монотонно увеличивается от одного торца барабана к другому. Очевидно, что в данном случае, средняя масса частиц в целевом продукте зависит от его выхода. С уменьшением выхода средняя масса частиц в целевом продукте будет увеличиваться.

Исследованы технологические возможности использования принципа управления сегрегированными потоками зернистого материала, которые образуются на гравитационном скате, для подготовки пивоваренного ячменя с повышенной экстрактивностью. Экстрактивность повышается путем выделения из зернового вороха сырья с наибольшей массой 1000 зерен. Проведена сепарация исходного зерна одновременно по размеру и плотности в барабанном аппарате. Аппарат снабжен барабаном диаметром 0,5 и длиной 1,5 м, который связан с приводом, обеспечивающим его вращение с регулируемой скоростью. Внутри барабана установлены насадочные устройства, аналогичные изображенным на рис. 1. Для подачи исходного материала в центральную часть барабана использован вибрационный дозатор. Исходным сырьем служила фуражная фракция ячменя сорта «Гонар». Зерно предварительно очищено от сорных примесей и части колотого зерна ситовым способом.

Таблица 1

## Результаты исследования качества ячменя

Показатели	Отходы	Исходное зерно	Целевая фракция
Масса 1000 зерен в перерасчете на сухое вещество, г	34,4	39,4	45,2
Энергия прорастания, %	92,3	93,1	95,0
Способность прорастания, %	93,5	94,3	96,1
Экстрактивность ячменя в пересчете на сухое вещество, %	47,7	58,7	70,7

Исследование проведено при производительности  $0,125 \text{ кг}\cdot\text{с}^{-1}$  с выходом целевой фракции около 50 %. Исходное сырье, целевая фракция и условные отходы процесса сепарации проанализированы по основным показателям качества, регламентируемым для пивоваренного ячменя. Анализ проведен с использованием методик, которые регламентируются государственными стандартами для определения: массы 1000 зерен ГОСТ 10842–89 [15]; энергии прорастания и способности прорастания ГОСТ 10968–88 [16]; экстрактивности ячменя ГОСТ 12136–77 [17]. Результаты исследования качества исходного сырья и продуктов его сепарации по показателям, регламентируемым для пивоваренного ячменя, представлены в табл. 1.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что по всем проанализированным показателям качества зерно целевой фракции существенно превосходит зерно исходного сырья. Сепарация исходного зерна одновременно по размеру и плотности позволила выделить целевую фракцию, в которой зерна имеют массу, превышающую на 14,7 % массу зерна в исходном материале. Установлено, что с увеличением массы зерна в целевой фракции наблюдается увеличение энергии прорастания на 1,7 % и повышение способности к прорастанию на 1,8 %. В аспекте решаемой технологической задачи особое внимание обращает на себя эффект повышения экстрактивности зерна целевой фракции на 20,4 % по сравнению с исходным зерном.

Результат следует рассматривать в качестве доказательства целесообразности фракционирования исходного зернового сырья пивоваренного производства в целях выделения целевой фракции с наибольшей массой 1000 зерен. В зависимости от величины этого показателя в исходном материале выполнение названной операции позволяет либо обеспечить выполнение регламентных требований по качеству сырья, либо снизить нормы его расхода на производство пива заданного качества.

Следует отметить, что сепарация зерна одновременно по размеру и плотности позволяет минимизировать механические потери ценного сырья по сравнению с вариантом поэтапного сепарирования. Кроме того, вследствие эффектов самосепарации зерна и в отсутствие жесткого механического воздействия на него со стороны рабочих органов сепаратора зерно травмируется в минимальной степени, что положительно отражается на показателях способности к прорастанию и энергии прорастания.

### *Список литературы*

1. Пивоваренное сырье. Солод [Электронный ресурс] / Искусство виноделия в России. – Режим доступа: <http://wine.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000029/st003.shtml> (дата обращения: 20.08.2017).
2. Стратегия развития пищевой и перерабатывающей промышленности России на период до 2020 г.: от 17 апреля 2012 г. № 559-РФ [Электронный ресурс] // Консультант Плюс. – Режим доступа : <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/18337.html> (дата обращения: 20.08.2017).
3. Ториков, В. В. Урожайность и пивоваренные качества зерна новых сортов ярового ячменя / В. В. Ториков // Вестн. Брянской гос. с.-х. акад. – 2010. – № 4. – С. 1 – 7.
4. О качестве зерна урожая 2013-2014 годов. [Электронный ресурс] / Министерство сельского хозяйства. – Режим доступа: <http://www.mcx.ru/news/news/show/27614.htm> (дата обращения: 20.08.17).
5. Воронина, П. А. Разработка технологии и товароведная характеристика пива с экстрактом ячменя / П. А. Воронина // Изв. Самарской гос. с.-х. акад. – 2013. – № 4. – С. 108 – 113.
6. Пат. 2351643 Российская федерация, МПК С12С 7/01 (2006/01). Способ приготовления затора / В. Т. Христюк, ГОУВПО «КубГТУ» ; заявл. 19.11.2007 ; опуб. 10.04.2009 , Бюл. № 10.
7. Пат. 2147313 Российская федерация, МПК С12С 1/02. Способ производства солода / К. В. Кобелев, Л. А. Оганесянц, А. В. Сухоруков, И. В. Селина, М. С. Созинова, Всероссийский научно-исследовательский ин-т пивоваренной, безалкогольной и винодельческой пром-ти ; заявл. 08.09.1998 ; опуб. 10.04.2000, Бюл. № 6.
8. Гончаров, Н. Ф. Влияние крупности зерна ячменя на качество солода / Н. Ф. Гончаров, А. А. Тарасов // Проблемы развития аграрного сектора региона: сб. материалов Всероссийской науч.-практ. конф. – Курск, 2006. – С. 152 – 154.
9. Титова, Е. М. Продуктивность и качество сортов пивоваренного солода. / Е. М. Титова, М. А. Внукова // Вестн. Орловского гос. аграрного ун-та. – 2008. – Т. 12, № 3. – С. 5 – 8.
10. Горпинченко, Т. В. Оценка качества сортов сельскохозяйственных культур как сырья для переработки / Т. В. Горпинченко. – М., 2008. – 151 с.
11. Романенко, Г. А. Достижения и перспективы развития аграрной науки России / Г. А. Романенко // АПК: экономика, управление. – 2009. – № 3. – С. 3 – 7.
12. Процессы переработки зернистых материалов в управляемых сегрегированных потоках / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов, А. Н. Куди // Теорет. основы хим. технологии. – 2014. – Т. 48, № 4. – С. 404 – 413.
13. Иванов, О. О. Управление сегрегированными потоками сыпучих материалов для их обработки методами разделения и соединения / О. О. Иванов, В. А. Пронин, Е. А. Рябова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 408 – 410.
14. Долгунин, В. Н. Кинетика сегрегации частиц различной шероховатости и упругости при быстром гравитационном течении зернистой среды / В. Н. Долгунин, О. О. Иванов, А. А. Уколов // Теорет. основы хим. технологии. – 2009. – Т. 43, № 2. – С. 187 – 196.
15. Зерно зерновых и бобовых культур и семена масличных культур. Метод определения массы 1000 зерен или 1000 семян [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.internet-law.ru/gosts/gost/28508](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/28508) (дата обращения: 30.11.2017).
16. Зерно. Методы определения энергии прорастания и способности прорастания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.internet-law.ru/gosts/gost/19633](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/19633) (дата обращения: 30.11.2017).
17. Зерно. Метод определения экстрактивности ячменя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.internet-law.ru/gosts/gost/33607](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/33607) (дата обращения: 30.11.2017).

## The Technology of Preparing Raw Grain for Bioconversion with High Extract Content

O.O. Ivanov<sup>1</sup>, E.A. Parfenova<sup>2</sup>, V.N. Dolgunin<sup>2</sup>

*Administration of the Tambov Region, Tambov, Russia (1);  
Department of Technologies and Equipment for Food and Chemical Industries,  
TSTU, Tambov, Russia (2); iooc4@mail.ru*

**Keywords:** raw grain; brewing barley; extract content; separation by mass; segregation; migration; controlled segregated flow.

**Abstract:** The principle of control over segregated flows of particulate solids is used to separate barley grain by size and density simultaneously. It was found out that the implementation of the principle on the basis of a drum apparatus allows separating the grain fraction with the highest grain mass, possessing high physiologic and extractive properties. The extract content of the separated grain fraction exceeds the extract content of the raw grain by 20 %.

### References

1. <http://wine.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000029/st003.shtml> (accessed 20 August 2017).
2. <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/18337.html> (accessed 20 August 2017).
3. Torikov V.V. [Evaluation of Suitability of Spring Barley For Brewer's Purposes], *Transactions of the Bryansk State Agrarian University*, 2010, no. 4, pp. 50-57. (In Russ., abstract in Eng.)
4. <http://www.mcx.ru/news/news/show/27614.htm> (accessed 20 August 2017).
5. Voronina P.A. [Technology Development and Extrudateв Barley Beer Characteristics], *Izvestiya Samarskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii* [Bulletin Samara State Agricultural Academy], 2013, no. 4, pp. 108-113. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Hristyuk V.T., GOUVPO «Kubanskiy Gosudarstvenniy Universitet» [Kuban State Technological University]; *Sposob prigotovleniya zatora* [Torque converter], Russian Federation, 2009, Pat. 2351643. (In Russ.)
7. Kobelev K.V., Oganesyanc L.A., Suhorukov A.V., Selina I.V., Sozinova M.S., Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut pivovarennoy, bezalkogolnoy i vinodelcheskoy promishlennosti, *Sposob prigotovleniya soloda* [Torque converter], Russian Federation, 2000, Pat. 2147313. (In Russ.)
8. Goncharov N.F., Tarasov A.A. [The effect of particle size of barley into quality malt], *Problemy razvitiya agrarnogo sektora regiona: nauchnaya konferenciya* [Problems of development of agricultural sector in the region: conference], Kursk, 2006, pp. 152-154. (In Russ.)
9. Titova, E. M., Vnukova, M. A. [Productivity and Quality of Malting Varieties of Malt], *Transaction of the Orel State Agrarian University*, 2008, vol. 12, no. 3, pp. 5-8. (In Russ.)
10. Gorpichenko T.V. *Ocenka kachestva sortov sel'skokozyajstvennykh kul'tur kaksyr'ya dlya pererabotki* [Assessment of quality varieties of agricultural crops as raw materials for processing], Moscow, 2008, 152 p. (In Russ.)
11. Romanenko G.A. [Achievements and prospects of development of agricultural science], *APK: ekonomika, upravlenie* [Aic: Economics, Management], 2009, no. 3, pp. 3-7. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A., Kudi A.N. [Processes of processing granular materials in managed segregated flows], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Basis Of Chemical Technology], 2014, vol. 48, no. 4, pp. 404-413. (In Russ., abstract in Eng.)

13. Ivanov O.O., Pronin V.A., Ryabova E.A. [Controlling of Segregated Flows of Granular Materials for Further Processing by Separation and Joining Methods], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 408-410 (In Russ., abstract in Eng.)

14. Dolgunin V.N., Ivanov O.O., Ukolov A.A. [Segregation kinetics of particles with different roughnesses and elasticities under a rapid gravity flow of a granular medium], *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2009, vol. 43, no. 2, pp. 187-195. (In Russ., abstract in Eng.)

15. [www.internet-law.ru/gosts/gost/28508](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/28508) (accessed 30 November 2017).

16. [www.internet-law.ru/gosts/gost/19633](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/19633) (accessed 30 November 2017).

17. [www.internet-law.ru/gosts/gost/33607](http://www.internet-law.ru/gosts/gost/33607) (accessed 30 November 2017).

---

### **Technologie der Vorbereitung des Kornrohstoffes für die Biokonversion mit erhöhtem Extraktgehalt**

**Zusammenfassung:** Das Prinzip der Steuerung der getrennten technologischen Flüsse von körnigen Schüttstoffen ist verwendet, um den Prozess der Gerstenkorntrennung gleichzeitig in Größe und Dichte zu organisieren. Es ist erwiesen, dass die Anwendung des Prinzips auf der technischen Basis der Apparatur mit der rotierenden Trommel erlaubt, die Kornfraktion mit der größten Kornmasse zu isolieren, die sich durch hohe physiologische und extraktive Eigenschaften auszeichnet. Der Extraktwert des Korns der isolierten Fraktion ist mehr als um 20 % höher als die Kornextraktion in dem Ausgangsmaterial.

---

### **La technologie de la préparation de matières premières pour la bioconversion avec une extractivité élevée**

**Résumé:** Le principe de la commande des flux technologiques ségrévés des matériaux en vrac est utilisé pour l'organisation du processus de la séparation des grains d'orge à la fois par la taille et par la densité. Est constaté que la mise en œuvre du principe sur la base technique de l'appareil avec un tambour tournant permet de fournir la fraction des grains avec la plus grande masse de grain, qui est caractérisée par des propriétés physiologiques et extractives. L'extractivité du grain de la fraction fournie est plus de 20 % que extractivité du grain dans les matières premières.

---

**Авторы:** *Иванов Олег Олегович* – кандидат технических наук, доцент, первый заместитель главы администрации Тамбовской области; *Парфенова Екатерина Андреевна* – магистрант; *Долгуни Виктор Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии и оборудование пищевых и химических производств», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техническая безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА СМАЧИВАНИЯ ОРОСИТЕЛЕЙ ГРАДИРНИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. В. Скопинцев<sup>1</sup>, Г. В. Божко<sup>1</sup>, С. А. Носков<sup>1</sup>, В. М. Нечаев<sup>2</sup>

*Кафедра «Техника и технология полимерных материалов»,  
ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет» (1), г. Москва, Россия;  
iskopincev@mail.ru; кафедра «Технологические процессы,  
аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ» (2),  
г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** базовый компонент; гидрофильность поверхности; композиция; краевой угол смачивания; наполнители; полимерные насадки для градирен.

**Аннотация:** Разработаны составы экологически чистых полимерных композиций из вторичных материалов для изготовления оросителей градирен. Исследованы: гидрофильность поверхности образцов из разных композитов с помощью определения краевого угла смачивания; композиционные материалы с разными наполнителями и их количественным составом. Базовым компонентом являлся вторичный гранулированный полиэтилен низкого давления литьевой марки 277-73; наполнители – древесная мука, углеродное волокно и базальтовая вата.

---

Разработка состава полимерной композиции для градирен является актуальной задачей при производстве эффективных конструкций оросителей. Эффективность процесса испарительного охлаждения в градирях определяется не только конструктивными особенностями оросителей, но и в значительной мере свойствами композиций полимерных материалов, используемых для их изготовления. Одним из таких определяющих свойств композиции является гидрофильность поверхности, позволяющая равномерно распределять пленку воды по оросителю, что увеличивает активную поверхность контакта воды с воздухом в единице объема насадки [1].

В настоящее время для изготовления оросителей в промышленной практике используются оросители, изготовленные на основе базовых марок полимера со стандартным наполнением стабилизаторами. Так как на процесс испарительного охлаждения положительно влияет гидрофильность поверхности оросителя (за счет способности создавать тончайшие пленки на поверхности оросителя), то идет поиск соответствующих композиций. Дополнительным условием поиска является невысокая стоимость компонентов.

Данная статья посвящена исследованию гидрофильности поверхности образцов из разных композиций с помощью определения ее смачиваемости для выбора материала оросителей градирен.

В Московском политехническом университете на кафедре «Техника и технология полимерных материалов» разработаны составы полимерных композиций с добавлением к базовым маркам полимера наполнителей, которые являются наиболее дешевыми и благоприятно влияющими на гидрофильность поверхности.

За основное связующее взят вторичный гранулированный полиэтилен низкого давления литьевой марки 277-73, получаемый газофазным методом. В качестве наполнителей использовались отходы производств: древесная мука, углеволокно и базальтовая вата.

Физико-механические характеристики композиций на основе полимерных материалов существенно зависят от гомогенности полученных смесей, которая, в свою очередь, определяется параметрами смешения на конкретном оборудовании. Для получения однородной смеси в условиях повышенных температур (выше температуры плавления полимера) использовались смесительные вальцы, обеспечивающие высокие сдвиговые деформации при смешении композиции, что ведет к равномерному распределению наполнителей в расплаве полимера. При гомогенизации композиции смесительные вальцы разогревались до температуры 150 °С. По окончании процесса смешения однородная полимерная композиция снималась с вальцов для дальнейшего охлаждения и измельчения в ножевой дробилке с последующим использованием в термопластавтомате [2].

Для исследования гидрофильности полимерных композиций проводились испытания по определению краевого угла смачивания методом растекающейся капли на поверхности новых композитов. Изготовлены образцы новых композитов с разным наполнителем и его составом, представляющие собой плоские диски диаметром 60 мм. Исследованы 10, 20, 30%-е соотношения наполнителя с полимером.

Краевой угол смачивания  $\theta$  является характеристикой гидрофильности (гидрофобности) поверхности композита [3]. Он определяется как угол между касательной АВ, проведенной к поверхности смачивающей жидкости, и смачивающей поверхностью твердого тела АА, а также всегда отсчитывается от касательной в сторону жидкой фазы (рис. 1). Касательную проводят через точку соприкосновения трех фаз: твердой (композита), жидкости (дистиллированной воды) и газа (воздуха). То есть о процессах, происходящих на границе твердого тела с другими фазами, судят по углу  $\theta$ , который служит мерой смачивания жидкостями поверхности твердого тела и косвенно характеризует взаимодействие твердого тела с другими фазами. Чем меньше угол, тем больше гидрофильность поверхности.

Для изучения смачиваемости поверхностей твердых тел с определением краевого угла смачивания использовали установку, представленную на рис. 2. Измерения углов смачивания испытуемых образцов проводили следующим образом. Испытываемый композиционный материал 1 устанавливали на столик-держатель 3 и включали лампу-осветитель 8. Настраивали объектив фотокамеры 7 на одном уровне с исследуемым образцом и с помощью шприца наносили каплю дистиллированной воды объемом 3 мм<sup>3</sup> на поверхность испытуемого образца у его края, обращенного в сторону фотокамеры.

Настройкой резкости изображения фотокамеры добивались такого положения капли, чтобы она вся располагалась в поле зрения окуляра вместе с образцом (вид с боку). Фотографирование проводили через пять минут с момента нанесения

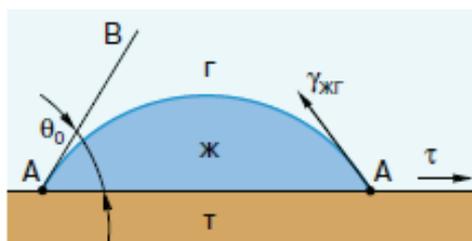
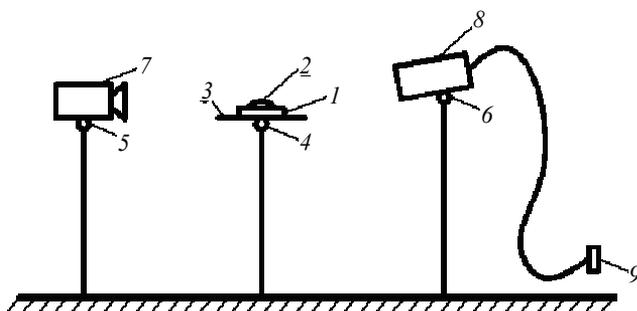


Рис. 1. Схема определения краевого угла смачивания  $\theta$

капли, так как полимерная композиция обладает способностью впитывать воду через поры на своей поверхности, и затем по фотографии замеряли краевые углы смачивания. Для уменьшения погрешности измерения для каждой капли краевой угол смачивания определяли с левой и правой ее сторон. В результате проведения серий экспериментов получены среднearифметические значе-



**Рис. 2. Схема установки для определения краевого угла смачивания:**

1 – испытываемый материал; 2 – дистиллированная вода; 3 – столик-держатель;  
4, 5, 6 – регулировочные винты; 7 – фотокамера; 8 – осветитель; 9 – источник питания

ния краевого угла  $\theta$  (с левой и правой сторон капли), представленные в табл. 1 для различных композиций.

Определение истинного значения измеряемой величины угла  $\theta$ , из пяти его независимых измерений, проводили по специальной методике [4]. Для примера представлена методика получения интервала значения краевого угла смачивания для ПНД 277-73 100. Измерения по данному образцу заносили в табл. 2 в графу исходные данные.

Таблица 1

**Краевой угол смачивания полученных образцов**

Процентные соотношения, %	$t$ , мин	$\theta$ (по результатам испытаний), °					Расчетный интервал $\theta$ , °
ПНД 277-73 100	5,00	58,50	61,75	59,75	57,25	58,00	55,41...62,69
Древесная мука 10		56,25	55,00	55,75	55,25	56,00	54,66...57,34
Древесная мука 20		50,25	49,25	51,00	49,00	50,00	48,42...51,58
Древесная мука 30		45,25	44,25	45,75	43,75	45,00	42,61...46,15
Углеволокно 10		59,50	60,50	61,00	61,50	59,75	58,97...61,65
Углеволокно 30		49,75	48,25	48,25	49,50	49,00	47,72...50,08
Базальтовая вата 10		64,25	64,75	63,00	63,25	64,50	62,68...65,4
Базальтовая вата 20		57,50	57,75	58,00	57,75	58,25	56,72...59,28
Базальтовая вата 30		51,25	51,25	51,25	50,75	52,00	50,3...52,88

Таблица 2

## Результаты расчетов интервала краевого угла смачивания

Исходные данные		Расчет			Контроль		
$x, ^\circ$	$m$	$u$	$mu$	$mu^2$	$v$	$mv$	$mv^2$
58,50	1,00	-1,00	-1,00	1,00	0	0	0
61,75		5,50	5,50	30,25	6,50	6,50	42,25
59,75		1,50	1,50	2,25	2,50	2,50	6,25
57,25		-3,50	-3,50	12,25	-2,50	-2,50	
58,00		-2,00	-2,00	4,00	-1,00	-1,00	1,00
Сумма	5,00	-	0,50	49,75	-	5,50	55,75

Примечание:  $x$  – значение замера в эксперименте,  $^\circ$ ;  $m$  – число замеров.

За начало отсчета выбираем  $\theta = 59,0^\circ$  и интервал  $h = 0,5$ . Рассчитываем отклонение,

$$u_i = \frac{x_i - \theta}{h}. \quad (1)$$

С помощью полученных сумм подсчитаем средние значения отклонений,

$$\bar{u} = \frac{mu}{\Sigma m} = \frac{0,5}{5} = 0,1^\circ. \quad (2)$$

Определяем среднеарифметическое значение,

$$\bar{x} = \theta + h\bar{u} = 59,0 + 0,5 \cdot 0,1 = 59,05^\circ. \quad (3)$$

Находим среднее квадратическое отклонение,

$$S^* = h\sqrt{\frac{\Sigma mu^2}{m} - (\bar{u})^2} = 0,5\sqrt{\frac{49,75}{5} - (0,1)^2} = 1,58. \quad (4)$$

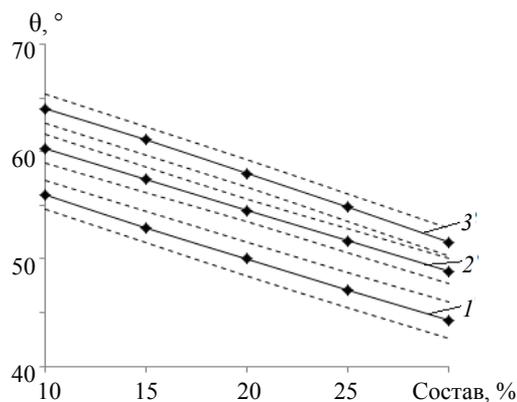


Рис. 3. Зависимость краевых углов смачивания от состава полимерной композиции:  
 1 – древесная мука; 2 – углеволокно; 3 – базальтовая вата;  
 - - - - - 99%-е доверительные границы

Далее проводим расчеты при следующем начале отсчета  $\theta_1 = 58,5^\circ$ . Рассчитывали отклонение,

$$\bar{v}_i = \frac{mv}{\Sigma m} = \frac{5,5}{5} = 1,1^\circ; \quad (5)$$

$$\bar{x} = \theta_1 + h\bar{u} = 58,5 + 0,5 \cdot 1,1 = 59,05^\circ; \quad (6)$$

$$S^* = h\sqrt{\frac{\Sigma mv^2}{m} - (\bar{v})^2} = 0,5\sqrt{\frac{55,75}{5} - (1,1)^2} = 1,58. \quad (7)$$

Истинное значение измеряемого угла  $\theta$  оцениваем с надежностью определения  $\Phi = 0,99$ . По заданной надежности  $\Phi = 0,99$  и числу степеней свободы  $k = 4$  при пяти измерениях находили по таблице источника [4] распределение Стьюдента  $S = 4,604$  и получали доверительную оценку в градусах и истинного значения угла  $\theta$

$$(\theta - \bar{x}) < t(\Phi; k) \frac{S^*}{\sqrt{k}}; \quad (8)$$

$$(\theta - \bar{x}) = (\theta - 59,05) < 4,604 \frac{1,58}{\sqrt{4}} = 3,64. \quad (9)$$

Таким образом, с надежностью 99 % можно считать, что значение краевого угла смачивания  $\theta$  для ПНД 277-73 100 % заключено в интервале 55,41...62,69. Для наглядности изменение краевого угла смачивания в зависимости от процентного соотношения наполнителя и полимера представлено на рис. 3.

В результате исследований получена зависимость краевых углов смачивания от процентного содержания наполнителя в полимерной композиции. Используемые добавки увеличивают гидрофильность поверхности оросителя из композитов по сравнению с поверхностью оросителя из одного базового полимера.

Установлено, что с увеличением концентрации наполнителя в полимерной композиции краевой угол смачивания существенно уменьшается, то есть увеличивается гидрофильность поверхности насадок, что ведет к замедлению движения водной пленки с увеличением ее способности к растеканию. Данный фактор должен приводить к более эффективной работе насадочных колонн в процессе массо- и теплообмена. Следовательно, предложенные композиции могут быть использованы на практике для изготовления оросителей градирен.

#### *Список литературы*

1. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий : справ. пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев ; под ред. В. С. Пономаренко. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
2. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология : учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
3. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М. : Химия, 1976. – 232 с.
4. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента: справочное руководство / Л. З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 192 с.

## Determination of the Wetting Angle of Sprinklers for Cooling Towers Made of Composite Materials

I. V. Skopintsev<sup>1</sup>, G. V. Bozhko<sup>1</sup>, S. A. Noskov<sup>1</sup>, V. M. Nechaev<sup>2</sup>

*Department of Technology and Technology of Polymer Materials,  
Moscow Polytechnic University (1), Moscow, Russia; iskopincev@mail.ru;  
Department of Technological Processes, Devices and Technosphere Safety (2),  
TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** base component; fillers; nozzles for cooling towers; polymer composition; the hydrophilicity of the surface; wetting angle.

**Abstract:** Compositions for organic polymeric compositions of secondary materials for the manufacture of sprinklers for cooling towers are developed. We investigated the hydrophilicity of the sample surface of different composites, determining contact angle of wetting. Studied composite materials with different fillers and their quantitative composition. The base component was the secondary granulated polyethylene of low-pressure injection brand 277-73. Fillers were wood flour, carbon fiber and basalt wool. By the results of the experiments we obtained the dependence of the contact wetting angle on the percentage of filler in the polymer composition. The additives increase the hydrophilicity of the sprinkler surface made from composites compared to the surface of the sprinkler made from one base polymer.

### References

1. Ponomarenko V.S., Aref Y.I., Ponomarenko V.S. [Ed.]. *Gradirni promyshlennykh i energeticheskikh predpriyatii: spravochnoe posobie* [Cooling Towers of Industrial and Energy Facilities: a Handbook], Moscow: Energoatomizdat, 1998. 376 p. (In Russ.)
2. Kerber M.L., Vinogradov V.M., Golovkin G.S., Berlin A.A. [Ed.]. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya: uchebnoe posobie* [Polymer composite materials: structure, properties, technology: a tutorial], St. Petersburg: Profession, 2008, 560 p. (In Russ.)
3. Summ B.D., Goryunov Yu.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physical-chemical fundamentals of wetting and spreading], Moscow: Chemistry, 1976, 232 p. (In Russ.)
4. Rumshiskii L.Z. *Mathematical processing of experimental results: Spravochnoe rukovodstvo* [Mathematical processing of experimental results: Reference Manual], Moscow: Nauka, 1971, 192 p. (In Russ.)

---

## Bestimmung des Benetzungskontaktwinkels der Kühlturbewässerer aus polymeren Verbundwerkstoffen

**Zusammenfassung:** Es sind Zusammensetzungen von umweltfreundlichen Polymerkompositionen aus Sekundärmaterialien für die Herstellung der Kühlturbewässerer entwickelt. Die Hydrophilie der Oberfläche der Proben aus verschiedenen Verbundwerkstoffen wurde durch Bestimmung des Benetzungskontaktwinkels untersucht. Erforscht wurden zusammengesetzte Materialien mit verschiedenen Füllstoffen und deren quantitative Zusammensetzung. Die Grundkomponente war ein sekundäres granuliertes Niederdruckpolyethylen der Gussorte 277-73. Füllstoffe waren Holzmehl, Kohlefaser und Steinwolle. Nach den Ergebnissen der Experimente ist die Abhängigkeit der Benetzungskontaktwinkel von dem Prozentsatz des Füllstoffs in der Polymerzusammensetzung festgestellt worden. Die verwendeten Additive erhöhen die Hydrophilie der Sprinkleroberfläche aus den Kompositen im Vergleich zur Sprinkleroberfläche aus einem einzigen Basispolymer.

## **Définition de l'angle de limite du trempage des arroseurs du tour de refroidissement à partir des matériaux polymères composites**

**Résumé:** Sont élaborées des compositions des polymères propres écologiques à partir des matériaux recyclés pour la fabrication des arroseurs des tours de refroidissement. Est étudié le caractère hydrophile de la surface des échantillons de différents matériaux composites à l'aide de la définition de l'angle de limite du trempage. Sont étudiés des matériaux composites avec de différentes garnitures et leur composition quantitative. Le composant de base était le polyéthylène granulé secondaire de la basse pression d'injection de la marque 277-73. Les enduits étaient la farine de bois, la fibre de carbone et la laine de roche. Selon les résultats des expériences, est obtenue la dépendance de la valeur des angles de limite de trempage du pourcentage de la charge dans la composition de polymère. Les additifs utilisés augmentent l'hydrophilie de la surface de l'arroseur à partir des composites par rapport à la surface de l'arroseur à partir d'un des polymères de base.

---

**Авторы:** *Скопинец Игорь Викторович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техника и технология полимерных материалов»; *Божко Григорий Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технология полимерных материалов»; *Носков Сергей Александрович* – аспирант кафедры «Техника и технология полимерных материалов», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва; *Нечаев Василий Михайлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Лагуткин Михаил Георгиевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств», ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», г. Москва, Россия.

---

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОЛИЗОМ

Е. А. Савельева, М. П. Дикун

*Кафедра «Химические технологии», ФГБОУ ВО «Энгельсский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Ю. А. Гагарина», г. Энгельс, Россия;  
mariapavlovna93@yandex.ru*

**Ключевые слова:** катионы меди; нестационарный электролиз; степень очистки; утилизация отработанных медьсодержащих растворов.

**Аннотация:** Рассмотрен механизм электроосаждения катионов меди из разбавленных растворов. Изучено влияние материала катода на степень электрохимической очистки модельных растворов, содержащих катионы меди, а также исследованы и предложены технологические параметры утилизации отработанных растворов травления медных сплавов импульсным электролизом. На графитовом катоде при электролизе импульсными токами отработанного раствора травления латунных изделий можно получить плотный осадок металлической меди. Рассмотрена возможность применения в качестве катода графитированного углеродного волокна в целях увеличения рабочей площади поверхности. Даны практические рекомендации по режимам электролиза и материалам электродов.

---

### Введение

Гальваническое производство является одним из наиболее опасных с экологической точки зрения. Использование в производстве агрессивных электролитов в целях придания изделиям требуемых технических характеристик создает многообразие загрязнений промывных и сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Особенно опасные загрязняющие компоненты – тяжелые металлы. Поэтому вопросы эффективной очистки в процессах обработки металлов в настоящее время весьма актуальны.

Не менее важной проблемой становится регенерация химических реагентов. Количество сбрасываемых со сточными водами тяжелых металлов свидетельствует не только о серьезном загрязнении природной среды, но и расточительном обращении с цветными металлами. Организация процессов регенерации позволяет создать экологически чистое производство с замкнутым циклом по регенерируемым электролитам.

Операции травления меди и ее сплавов являются важнейшими в различных электрохимических производствах. В ходе процесса травильный раствор обогащается ионами меди и в определенный момент (при концентрации  $\text{Cu}^{2+} \approx 10 \dots 16$  г/л) становится непригодным для дальнейшей эксплуатации [1, 2]. Отработанные тра-

вильные растворы относятся к высокотоксичным отходам и опасны для окружающей среды. На многих предприятиях для травильных растворов до сих пор применяется метод частичного сброса отработанного раствора на очистные сооружения с разбавлением водой и последующей реагентной обработкой. В то же время данные растворы являются источником получения товарной меди и других цветных металлов [3 – 6]. Наиболее перспективный – электрохимический метод. Сочетания электрохимического осаждения меди на катоде как конечной стадии утилизации, с предшествующими стадиями (в том числе реагентными) позволит повысить эффективность очистки сточных вод и, соответственно, увеличить количество извлекаемой меди. Экономическая целесообразность электрохимического способа очевидна: стоимость полученной меди приблизительно в 10 раз выше стоимости затраченной электроэнергии (5 кВт·ч/кг). Поэтому даже без учета экологической эффективности процессы электрохимической утилизации растворов травления меди и ее сплавов высокоэффективны [7 – 10].

Применение импульсного электролиза – достижение в электроосаждении металлов [11], способствующее формированию равномерных по толщине, компактных осадков, имеющих хорошую адгезию к основе. Импульсный ток изменяет процессы массопереноса, повышает скорость зародышеобразования. В паузе между импульсами тока происходят процессы диффузии ионов металла к электроду, десорбция из осадка атомов водорода, проникших в него при электроосаждении. Для разбавленных по катиону металла растворов импульсный электролиз является перспективным. Цель исследований – разработка технологических параметров эффективной утилизации отработанных растворов травления медных сплавов с применением импульсного электролиза.

### Методика эксперимента

В качестве объектов исследования взяты модельные растворы нитрата меди концентрацией 0,2...4 г/л и отработанные нитратные растворы травления медных сплавов с предприятия ООО ЭПО «Сигнал» (г. Энгельс), содержащие азотную кислоту, катионы меди 16 и 7,9 г/л, а также катионы цинка, железа и никеля. В качестве рабочих электродов использовались платина (Пл99,8), медь (М1), титан (ВТ-1), графитовая фольга (ГФ-2) и углеродное волокно графитированное. Противоелектродом служил алюминий; электрод сравнения – нормальный хлор-серебряный; рабочая площадь электродов 1...4 см<sup>2</sup>; объем растворов 15...25 мл.

Исследование электровосстановления катионов меди из растворов проводилось гальваностатическим, потенциостатическим и потенциодинамическим методами, а также очистка модельных и отработанных растворов импульсным электролизом проводилась на потенциостатах Р8 и Р8S с автоматической записью на ПК. Отработанный раствор травления частично нейтрализовали до pH=4...5 раствором NaOH концентрации 400 г/л. Остаточная концентрация катионов меди после очистки определялась по оптической плотности на фотоколориметре марки КФК-3-01 (ЗОМЗ) при длине волны 900 нм и аналитически с помощью атомно-адсорбционного спектрометра «Квант-2АТ». Анализ состава поверхностных слоев проводился с помощью анализатора металлов X-MET 7500 (рентгенофлуоресцентный портативный энергодисперсионный спектрометр). Степень очистки  $X_{с.о}$  рассчитывалась по формуле

$$X_{с.о} = \frac{C_{нач} - C_{кон}}{C_{нач}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $C_{нач}$ ,  $C_{кон}$  – концентрация катионов меди в растворе до и после очистки соответственно, г/л.

Ток в импульсе выбран согласно [9]; время импульса и паузы – источник [10]; общее время электролиза – 2 часа.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

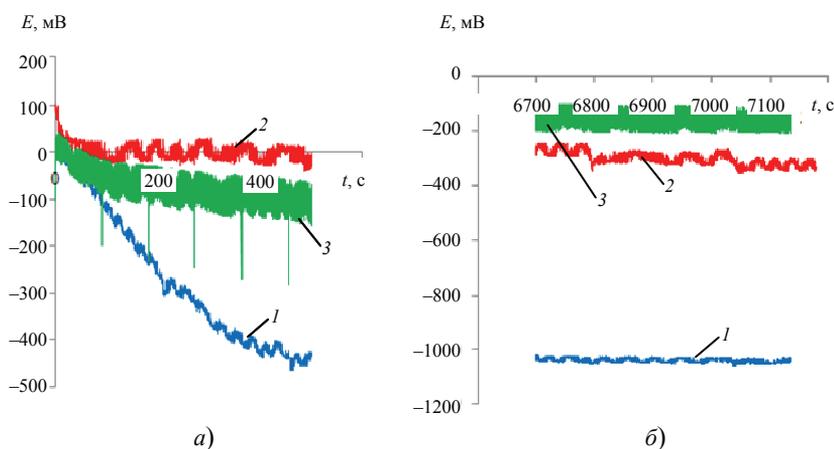
Для выявления областей потенциалов восстановления катионов меди на платиновом катоде сначала снимались потенциодинамические кривые (ПДК) от стационарного потенциала до  $-1$  В для различных концентраций модельного раствора при скорости развертки  $8$  мВ/с. При потенциалах  $-0,5 \dots -0,6$  В ток на ПДК достигает максимума или выходит на площадку. При потенциалах, лежащих в области восстановления катионов меди на ПДК, снимались потенциостатические ( $i-t$ ) кривые. После подъема кривой в момент включения поляризации следует падение плотности тока, что может указывать на наличие замедленной диффузии в суммарном электродном процессе.

Для подтверждения диффузионного механизма спадающая часть потенциостатической кривой ( $i-t$ ) проанализирована в координатах ( $i-1/\sqrt{t}$ ). Полученные прямолинейные зависимости не экстраполируются в начало координат, что подтверждает замедленную диффузию, а также параллельно протекающую замедленную стадию химической реакции. Для всех исследованных условий рассчитывалось в соответствии с уравнением

$$C\sqrt{D} = \frac{\Delta i}{\Delta(1/\sqrt{t})} \frac{\sqrt{\pi}}{zF}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $i$  – плотность тока в момент времени  $t$ ,  $\text{А}/\text{см}^2$ ;  $t$  – время, с;  $z$  – число электронов, участвующих в реакции;  $F$  – постоянная Фарадея ( $F = 96485,33$  Кл/моль).

Величина  $C\sqrt{D}$  лежит в пределах:  $(0,33 \dots 5,03) \cdot 10^{-6}$  моль/ $(\text{см}^2 \cdot \text{с}^{1/2})$  и свидетельствует о замедленности диффузии катионов меди из раствора к поверхности электрода, причем при смещении потенциала в более отрицательную сторону диффузионные ограничения растут. Одним из способов частичного снижения или полного исключения концентрационных затруднений в растворе является применение импульсного электролиза. На рисунке 1 представлены начальные и конечные участки кривых изменения потенциалов меди, титана и графита во времени в растворе  $0,5$  г/л  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  при импульсной поляризации.

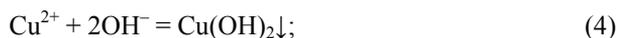


**Рис. 1. Изменение потенциалов медного (1), титанового (2) и графитового (3) электродов в растворе  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  во времени при поляризации импульсным током:**

$C_{\text{раствор}} = 0,5$  г/л;  $i_{\text{имп}} = 15$   $\text{мА}/\text{см}^2$ ;  $t_{\text{имп}} = 0,01$  с;  $t_{\text{пауза}} = 0,5$  с;  $T_{\text{опыт}} = 2$  ч

*a* – начальный участок; *б* – конечный участок

Кривая 1 представляет изменение потенциала во времени на медном электроде. В момент импульса тока происходит небольшое повышение потенциала, а в момент паузы потенциал стремится вернуться к исходному значению, но не достигает его. Происходит постепенное нарастание поляризации, потенциал смещается к отрицательным значениям. Ко времени 500 с потенциал достигает –450 мВ. При данном потенциале на катоде возможны реакции:



К концу поляризации потенциал находится в отрицательной области. Поверхность медного катода не претерпевает видимых изменений. На дно ячейки выпадает осадок гидроксида меди.

На титановом электроде (кривая 2) потенциал незначительно смещается в отрицательную область и к концу процесса составляет –350 мВ, что отвечает процессу электроосаждения меди. При таких потенциалах выделение водорода не наблюдается. На катоде протекает реакция (5). На поверхности титанового катода получен плотный осадок меди.

Потенциал графитового электрода изменяется равномерно от стационарного (~200 мВ) до отрицательной границы потенциалов за первые 500 с процесса. К концу поляризации он достигает –200 мВ. Данные потенциалы отвечают процессу электроосаждения меди. В результате графитовый электрод равномерно покрывается слоем меди.

После двухчасовой импульсной поляризации раствор анализировался на содержание катионов меди. В таблице 1 представлены результаты по импульсной очистке модельных растворов.

Медный катод показал степень электрохимической импульсной очистки не выше 60 %, причем, очистка, в основном происходит, очевидно, за счет образования осадка гидроксида меди вследствие выделения водорода и подщелачивания прикатодного слоя. Титановый электрод показал при прочих равных условиях более высокую степень очистки раствора от катионов меди, чем медный катод. Максимальная величина степени очистки составила 70 % для раствора  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  0,2 г/л. Графитовый катод показал максимальную степень очистки исследуемых растворов, которая составила 99 % в случае раствора 0,2 г/л  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ . Графит в виде фольги может быть рекомендован для электрохимической очистки отработанных растворов травления медных сплавов. Для растворов более высоких концентраций время электролиза должно быть увеличено.

Таблица 1

Степень очистки растворов  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$  импульсным электролизом

$C_{\text{нач}}$ , г/л	Материал катода					
	медь		титан		графит	
	$C_{\text{кон}}$ , г/л	$X_{\text{с.о.}}$ , %	$C_{\text{кон}}$ , г/л	$X_{\text{с.о.}}$ , %	$C_{\text{кон}}$ , г/л	$X_{\text{с.о.}}$ , %
0,2	0,08	60	0,06	70	0,001	99
0,5	0,31	38	0,28	44	0,2	60
1,0	0,87	13	0,62	38	0,7	30
2,0	1,8	10	1,6	20	1,58	21
4,0	3,8	5	3,6	10	3,55	11

Полученные данные позволили выбрать оптимальный режим очистки отработанного нитратного медьсодержащего раствора травления: перед применением импульсного электролиза раствор разбавляли в четыре раза, а затем проводили цементацию на железной стружке в течение 10 мин. Разбавление раствора проводили во избежание разложения азотной кислоты, сопровождающегося бурным выделением диоксида азота. Импульсная очистка проводилась в течение двух часов, при  $t_{\text{имп}} = 0,1$  с,  $t_{\text{пауза}} = 2$  с,  $i_{\text{имп}} = 30$  мА/см<sup>2</sup> с графитовым катодом в виде фольги. Результаты по очистке представлены в табл. 2.

Из таблицы 2 следует, что степень комплексной очистки по катионам меди составляет 81 % по отношению к исходному раствору 16 г/л  $\text{Cu}^{2+}$ . Следует также отметить высокую степень очистки по другим компонентам группы тяжелых металлов, присутствующих в отработанном растворе:  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  – 92, 72 и 30 % соответственно. Низкая величина степени очистки для катионов железа объясняется растворением железной стружки в процессе цементации и соответственно, переходом дополнительного числа катионов железа в раствор.

В целях увеличения площади катода использовалось углеродное волокно, графитированное при  $T = 2400$  °С (ООО «Аргон», г. Балаково), которое имеет развернутую рабочую поверхность. Изучалось влияние времени импульса на степень очистки отработанного раствора травления и на выход по току для меди. Время импульса варьировалось 0,1...1 с. Результаты данного исследования представлены в табл. 3.

Таблица 2

**Степень очистки отработанного нитратного медьсодержащего раствора травления импульсным электролизом**

Катион тяжелого металла	Концентрация, мг/л				$X_{\text{с.о.}}$ , %
	в исходном растворе	в разбавленном растворе	после цементации (10 мин)	после импульсной очистки	
$\text{Cu}^{2+}$	16000	4000	2800	538,464	81
$\text{Zn}^{2+}$	10140	2535	2535	712,8	72
$\text{Ni}^{2+}$	566	141,5	85	5,804	92
$\text{Fe}^{2+}$	67,8	16,95	–	11,912	30

Таблица 3

**Влияние времени импульса на эффективность очистки и выход по току меди**

Время импульса, с	Концентрация по катионам меди в исходном растворе, мг/л	Концентрация по катионам меди в растворе после электролиза, мг/л	$X_{\text{с.о.}}$ , %	Выход по току меди, %
0,1	7,9	1,17	85,2	97,6
0,2		2,49	68,4	97,4
0,3		2,76	65,0	63,1
0,4		2,69	66,0	57,9
0,5		2,54	67,8	62,4
1		2,36	70,1	80,7

Как следует и табл. 3, использование в качестве катода углеродного волокна приводит к увеличению степени очистки отработанного раствора травления от катионов меди. Выход по току при времени импульса 0,1 и 0,2 с достигает почти 98 %.

### Заключение

Изучено влияние материала катода на степень очистки модельного раствора  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ . Максимальную степень очистки 99 % показал графитовый катод в виде фольги, на котором проведена доочистка отработанного травильного раствора импульсным электролизом с одновременным извлечением меди. Степень очистки по катионам меди составила 81 %. Осадок, полученный на катоде, содержит: 97,4 % Cu; 1,5 % Zn; 0,55 % Fe; 0,15 % Ni. Применение в качестве катода углеродного графитированного волокна приводит к одновременному увеличению степени очистки отработанного раствора травления от катионов меди и выхода по току меди.

### Список литературы

1. Кругликов, С. С. Регенерация травильных растворов и рекуперация меди в производстве печатных плат / С. С. Кругликов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1993. – Т. 2, № 4. – С. 69 – 73.
2. Абоносимов, Д. О. Применение мембранных технологий в очистке сточных вод гальванопроизводств / Д. О. Абоносимов, С. И. Лазарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т. 20, № 2. – С. 306 – 313.
3. The Study of Adsorption of Copper and Nickel Ions by Polyaniline and Its Nanocomposite with Carbon Nanotubes / Т. Р. Dyachkova [et al.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 1067 – 1072.
4. Регенерация меди из ванны улавливания после меднения из сернокислого электролита / А. В. Виноградова [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2010. – Т. 18, № 2. – С. 43 – 48.
5. Electrochemical Removal of Copper Ions from Dilute Solutions Using Packed Bed Electrode. Part II / I. A. Khattab [et al.] // Egyptian Journal of Petroleum. – 2013. – No. 22. – P. 205 – 210.
6. Electrolytic Recovery of Dilute Copper from a Mix Industrial Effluent of High Strength COD / S. Chellammal [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2010. – No. 180. – P. 91 – 97.
7. The Electrochemical Recovery of Metals from Effluent and Process Streams / D. A. Campbell [et al.] // Resources, Conservation and Recycling. – 1994. – No. 10. – P. 25 – 33.
8. Бондаренко, А. В. Экология и регенерация травильных растворов / А. В. Бондаренко, Е. И. Бубликов, С. А. Семенченко // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1993. – Т. 2, № 6. – С. 50 – 52.
9. Борисова, Т. Ф. Извлечение металлов из разбавленных растворов при импульсном электролизе / Т. Ф. Борисова, В. И. Кичигин // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1999. – № 3. – С. 43 – 47.
10. Гамбург, Ю. Д. Применение импульсных и нестационарных режимов при электроосаждении металлов и сплавов / Ю. Д. Гамбург // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2003. – Т. 11, № 4. – С. 60 – 65.
11. Килимник, А. Б. Электрохимические процессы на переменном токе / А. Б. Килимник, Е. Э. Дегтярева // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2006. – Т. 12, № 1А. – С. 92 – 106.

## The Efficiency of Cleaning of Copper Solutions by Pulsed Electrolysis

E. A. Savelieva, M. P. Dikun

*Department of Chemical Technology, Engels Technological Institute (Branch)  
of the Gagarin Saratov State Technical University, Engels, Russia;  
mariapavlovna93@yandex.ru*

**Keywords:** copper cations; degree of purification; non-stationary electrolysis; recycling of waste copper solutions.

**Abstract:** The mechanism of copper cations electrodeposition from dilute solutions is considered. The influence of cathode material on the degree of electrochemical purification of model solutions containing copper cations was studied; process parameters of utilization of spent solutions of etching copper alloys by pulse electrolysis are also investigated and proposed. In the electrolysis by pulse currents of the spent etching solution of brass products, a dense precipitate of metallic copper can be obtained on a graphite cathode. The possibility of using a graphitized carbon fiber as a cathode to increase the working surface area is considered. Practical recommendations on electrolysis modes and electrode materials are given.

### References

1. Kruglikov S.S. [Regeneration of etching solutions and recovery of copper in the manufacture of printed circuit boards], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 1993, vol. 2, no. 4, pp. 69-73. (In Russ.)
2. Abonosimov D.O., Lazarev S.I. [The usage of membrane technology in wastewater treatment electroplating], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no 2, pp. 306-313. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Dyachkova T.P., Melezhyk A.V., Morozova Zh.G., Shuklinov A.V., Tkachev A.G. [The study of adsorption of copper and nickel ions by polyaniline and its nanocomposite with carbon nanotubes], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 1067-1072. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Vinogradov A.V., Kladiti S.Y., Kudryavtsev V.N., Vinogradov S. [Regeneration of copper from copper plating bath after the capture of the sulfuric acid electrolyte], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 2010, vol. 18, no. 2, pp. 43-48. (In Russ.)
5. Khattab I.A., Shaffei M.F., Shaaban N.A., Hussein H.S., Abd El-Rehim S.S. Electrochemical removal of copper ions from dilute solutions using packed bed electrode. Part II, *Egyptian Journal of Petro-leum*, 2013, no. 22, pp. 205-210.
6. Chellammal S., Raghu S., Kalaiselvi P., Subramanian G. Electrolytic recovery of dilute copper from a mix industrial effluent of high strength COD, *Journal of Hazardous Materials*, 2010, no. 180, pp. 91-97.
7. Campbell D.A., Dalrymple I.M., Sunderland J.G., Tilston D. The electrochemical recovery of metals from effluent and process streams, *Resources, Conservation and Recycling*, 1994, no. 10, pp. 25-33.
8. Bondarenko A.V., Bublikov E.I., Semenchenko S.A. [Ecology and regeneration of pickling wastes-create], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 1993, vol. 2, no. 6, pp. 50-52. (In Russ.)
9. Borisov T.F., Kichigin V.I. [Extracting metals from dilute solutions at the impulse-rated electrolytic], *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 1999, no.3, pp. 43-47. (In Russ.)

10. Hamburg Y.D. The usage of pulsed and transient regimes of electrodeposition of metals and alloys, *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti* [Electroplating and Surface Treatment], 2003, vol. 11, no. 4, pp. 60-65. (In Russ.)

11. Kilimnik A.B., Degtyareva E.E. [Electrochemical processes with alternating current], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1A, pp. 92-106. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Reinigungsleistung der kupferhaltigen Lösungen durch Pulselektrolyse**

**Zusammenfassung:** Es ist der Mechanismus der elektrolytischen Abscheidung von Kupferkationen aus verdünnten Lösungen betrachtet. Der Einfluss von Kathodenmaterial auf den Grad der elektrochemischen Reinigung der Kupferkationen enthaltenden Modelllösungen ist erforscht und es sind technologische Parameter der Nutzung verbrauchter Lösungen von Kupferlegierungen durch Pulselektrolyse untersucht und vorgeschlagen. Auf einer Graphitkathode kann bei Elektrolyse einer verbrauchten Ätzlösung von Messingprodukten durch Pulsströme ein dichter Niederschlag von metallischem Kupfer erhalten werden. Es ist die Möglichkeit in Betracht gezogen, eine Graphitkohlenstofffaser als Kathode zur Erhöhung der Arbeitsoberfläche zu verwenden. Praktische Empfehlungen zu Betriebsvorschriften und Elektrodenmaterialien sind gegeben.

---

### **Efficacité de l'épuration des solutions contenant le cuivre par l'électrolyse d'impulsion**

**Résumé:** Est examiné le mécanisme de l'électrodéposition des cations de cuivre à partir des solutions diluées. Est étudiée l'influence du matériau de la cathode sur le degré de l'épuration électrochimique des solutions de modèles contenant des cations de cuivre; sont également étudiés et proposés les paramètres technologiques du recyclage des solutions usagées de la gravure des alliages de cuivre par l'électrolyse d'impulsion. Sur une cathode graphitique lors de l'électrolyse par les courants d'impulsion de la solution récupérée de la gravure des produits en laiton on peut obtenir une dense précipitation du cuivre métallique. Est examinée la possibilité d'appliquer en tant que cathode graphitique la fibre du carbone afin d'augmenter la surface de travail. Sont donnés des conseils pratiques sur les régimes de l'électrolyse et les matériaux d'électrodes.

---

**Авторы:** *Савельева Елена Анатольевна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Химические технологии»; *Дикун Мария Павловна* – аспирант кафедры «Химические технологии», ФГБОУ ВО «Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Ю. А. Гагарина», г. Энгельс, Россия.

**Рецензент:** *Целуйкин Виталий Николаевич* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Машины и аппараты нефтегазовых, химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Энгельский технологический институт (филиал) Саратовского государственного технического университета им. Ю. А. Гагарина», г. Энгельс, Россия.

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС И АГРЕГАТЫ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. С. Севостьянов<sup>1</sup>, В. И. Уральский<sup>1</sup>, И. П. Бойчук<sup>2</sup>,  
Д. Н. Перельгин<sup>1</sup>, Р. А. Ермилов<sup>1</sup>

*Кафедры: «Технологические комплексы, машины и механизмы» (1);  
«Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных  
систем» (2), ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический  
университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия; mehanikus@mail.ru*

**Ключевые слова:** вихреакустический диспергатор; постадийное измельчение; пресс-валковый измельчитель; технологический комплекс; тонкодисперсный продукт; центробежный помольно-смесительный агрегат.

**Аннотация:** Рассмотрено сверхтонкое измельчение перерабатываемых материалов как один из технологических приемов повышения качества выпускаемой продукции и расширения номенклатуры ее производства. Представлены научно-технические разработки по созданию энергосберегающего технологического комплекса и патентозащищенных агрегатов постадийного измельчения материалов, обеспечивающие развитие инновационных технологий для производства новых видов строительных материалов и изделий.

---

В строительной промышленности при производстве композиционных смесей с нанокompозитами, высококонцентрированных вяжущих суспензий, тонкой или специальной керамики, нанопокровтий, различных катализаторов и других смесей предпочтительным является комбинированный способ производства наноматериалов. Большое значение имеет разработка специальной техники и технологии для предварительной подготовки тонкодисперсных порошков (< 1 мкм). В настоящее время общепризнанной методологии производства и использования указанных материалов не существует [1 – 3].

Наравне с поиском областей рационального использования частиц наноразмера, перспективным направлением является организация постадийного измельчения материалов с обеспечением микродефектной структуры на первых стадиях, что может быть достигнуто за счет создания специальных агрегатов селективного помола и повышенной энергонапряженности. Измельчение частиц с микродефектной структурой, а также реализация возможности избирательного помола (изменение величины ударного, ударно-стирающего или истирающего воздействия) в помольном агрегате вибрационно-центробежного типа, работающего в открытом или замкнутом цикле, обеспечивает снижение энергозатрат до 20...30 % и повышает качество измельченного продукта [4].

На последней стадии помола, при резком снижении числа неизмельченных частиц с микродефектной структурой, механическое воздействие на степень из-

мельчения материала снижается. Поэтому целесообразно использовать вихреакустическое воздействие с реализацией резонансных процессов при высокоскоростных режимах работы агрегата (скорость энергоносителя достигает 100 м/с и более) [2].

Для получения высокодисперсных порошков необходимо осуществлять комплексный подход. При его реализации, а также создании техники селективного измельчения материалов, используем следующие механо-технологические приемы:

- организацию постадийных процессов измельчения с реализацией объемно-сдвигового деформирования материала и обеспечением его микродефектной структуры;

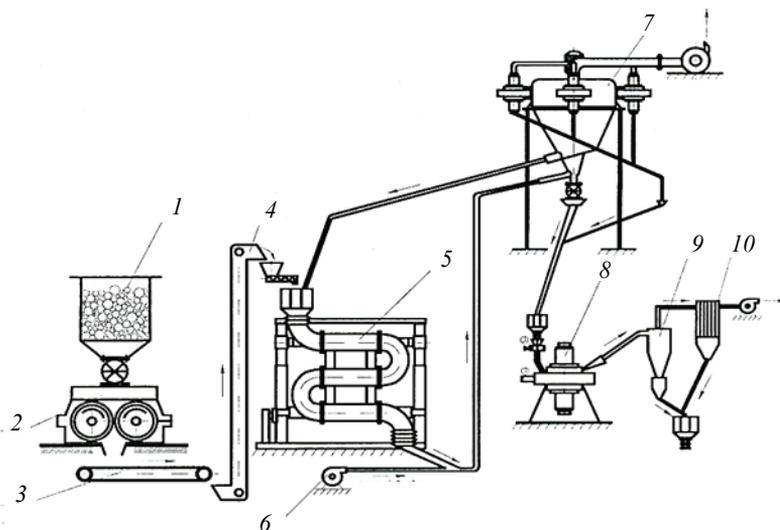
- осуществление внутреннего или внешнего рецикла измельченных материалов;

- обеспечение возможности изменения характера динамического воздействия мелющей среды на измельчаемый материал и режимов работы помольного агрегата;

- использование механо-химических способов интенсификации процессов разрушения частиц, особенно на микроуровне;

- реализацию открытого или замкнутого циклов измельчения и вихреакустического диспергирования измельченных частиц на последней стадии.

В направлении создания технологического комплекса для получения высокодисперсных материалов выполнены научно-технические разработки и проведен ряд исследований. За последние несколько лет разработаны машины, предназначенные для предразрушения материалов: пресс-валковые измельчители (ПВИ); центробежные помольно-смесительные агрегаты (ЦПСА); различные конструкции вихревых аппаратов (вихреакустические диспергаторы (ВАД)), совмещающие в себе комплекс динамических нагрузжений, способствующих эффективному получению высокодисперсных и ультрадисперсных порошков и др. Разработанные агрегаты используются в технологической линии (рис. 1), состоящей из ПВИ, ЦПСА, turbo-вихревого сепаратора (ТВС), ВАД и других агрегатов (рис. 2 – 4).



**Рис. 1. Технологическая линия для производства высокодисперсных материалов:**

1 – бункер; 2 – ПВИ; 3 – ленточный питатель; 4 – элеватор;

5 – помольно-смесительный агрегат; 6 – вентилятор; 7 – ТВС; 8 – ВАД;

9 – циклон; 10 – фильтр рукавный

Исходный материал поступает в приемный бункер 1, откуда ячейковым питателем подается в ПВИ 2. В пресс-валковом измельчителе происходит предварительное разрушение материала с обеспечением его микродефектной структуры. Далее материал ленточным питателем 3 и элеватором 4 подается в центробежный помольно-смесительный агрегат 5, в котором осуществляется избирательный тонкий помол предварительно измельченного материала. Измельченный материал поступает в трубопровод, где подхватывается потоком сжатого воздуха, создаваемым вентилятором 6, и направляется в ТВС 7, где происходит постадийное разделение тонко измельченного материала на фракции. Пройдя через сепаратор, грубая фракция материала возвращается на доизмельчение в ЦПСА, а тонкая, осаждаясь в выносных элементах, подается в ВАД 8, в котором осуществляется окончательное сверхтонкое доизмельчение материала. На выходе из ВАД газоматериальный поток направляется на осаждение в циклон 9 и рукавный фильтр 10. Осажденный материал является готовым продуктом.



**Рис. 2. Пресс-валковый измельчитель с цилиндрическим профилем валков**

На первой стадии измельчения для предварительного разрушения материала используется ПВИ (см. рис. 2). Эффективность использования предварительного измельчения материала в ПВИ перед его помолом в мельнице обусловлена не только рациональным способом реализации энергозатрат при непосредственном раздавливающе-сдвиговом воздействии рабочих органов (валков) на разрушаемый материал, но и обеспечением микродефектной структуры частиц, снижающей удельный расход электроэнергии при окончательном домоле материала в мельнице, в том числе в ЦПСА [5].

Отличительная особенность ЦПСА (см. рис. 3) – реализация в одной технологической машине стадий среднего, тонкого и сверхтонкого измельчений, что обеспечивается различными траекториями движения камер для соответствующих режимов работы мелющей загрузки: среднего помола – интенсивная ударная нагрузка и частичное истирание; тонкого помола – ударная нагрузка с увеличением степени истирания; сверхтонкого помола – интенсивное истирание [6, 7].



**Рис. 3. Центробежный помольно-смесительный агрегат**



**Рис. 4. Конструкция вихреакустического диспергатора с одной камерой помола**

Качество готового продукта зависит от измельчительного оборудования, находящегося в технологической линии на последней стадии. Получение продукта наноразмера в агрегатах, использующих механическое воздействие, весьма затруднено. Поэтому целесообразно использовать комбинированное физико-механическое воздействие на измельчаемый материал. В вихреакустическом диспергаторе (см. рис. 4) при измельчении используется принцип «саморазрушения частиц изнутри». Частицы разрушаются при комплексном воздействии в высокоскоростных вихревых потоках ( $>100$  м/с) [8 – 9], характеризующихся зонами огромного разрежения и сжатия.

Повышение эффективности тонкого измельчения материалов обеспечивается благодаря возможности изменения частоты акустических колебаний в камере помола. Вихреакустический диспергатор имеет рациональную технологическую компоновку камер измельчения, а вследствие работы агрегата по замкнутому циклу обеспечивается минимальное выделение пыли в окружающую среду.

Технические характеристики опытно-промышленных образцов:

– центробежного помольно-смесительного агрегата:

Производительность, кг/ч.....	50...150
Частота вращения эксцентрикового вала, об/мин...	250...350
Потребляемая мощность, кВт.....	1,1
Величина эксцентриситета, м.....	0,02
Объем камеры помола, м <sup>3</sup> .....	0,01
Средневзвешенный диаметр частиц готового продукта, мкм.....	30...50
Габаритные размеры, мм:	
длина.....	2202
ширина.....	816
высота.....	1290
Масса, кг.....	525

– вихреакустического диспергатора (см. рис. 4):

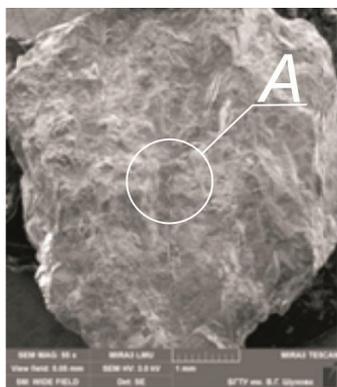
Производительность, кг/ч.....	до 35
Удельный расход энергоносителя, кг/кг.....	0,65...0,8
Рабочее давление, МПа.....	0,2...0,5
Средневзвешенный диаметр:	
исходного материала, мм.....	2 – 3
частиц готового продукта, мкм.....	$\leq 20$
Диаметр камеры помола, м.....	0,14...0,2
Габаритные размеры, мм:	
высота.....	1500
ширина.....	400
длина.....	600

Проведенные исследования по измельчению наиболее широко используемых строительных материалов с различными физико-механическими характеристиками (портланд-цемента и различных генетических типов кварцевых пород) представлены в табл. 1.

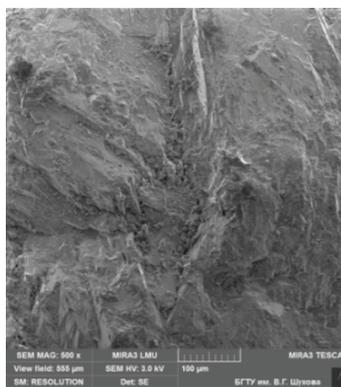
На рисунках 5 – 7 изображены микродефектная структура, размер и форма частиц кварцито-песчанника, измельченного постадийно в ПВИ (см. рис. 2), ЦПСА (см. рис. 3) и ВАД (см. рис. 4), объединенных в технологический комплекс для производства высокодисперсных материалов.

Результаты опытно-промышленных испытаний

Наименование материала	ПВИ			ЦПСА			ВАД		
	производительность $\times 10^3$ , кг/ч	удельная поверхность, $m^2/kg$	удельные затраты, (кВт·ч)/т	производительность, кг/ч	удельная поверхность, $m^2/kg$	удельные затраты, (кВт·ч)/т	производительность, кг/ч	удельная поверхность, $m^2/kg$	удельные энергозатраты, кг/кг
Кварцито-песчаник	До 2	-	3	100	540	18	35	1890	1,6
Песок					510				
Портланд-цемент	-	-	485		35				

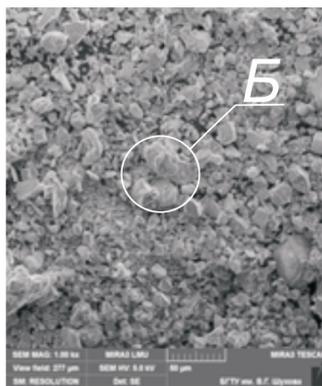


а)

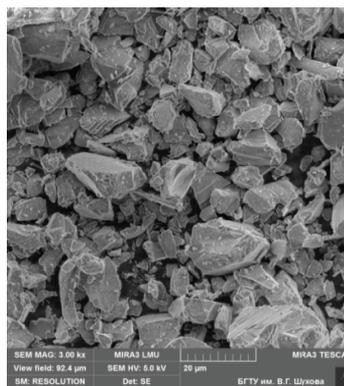


б)

Рис. 5. Микродефектная структура зерен кварцито-песчаника после многократного измельчения в пресс-валковом измельчителе:  
 а – локальный объект деформированного материала (спрессованной пластины);  
 б – микрообъект «А»

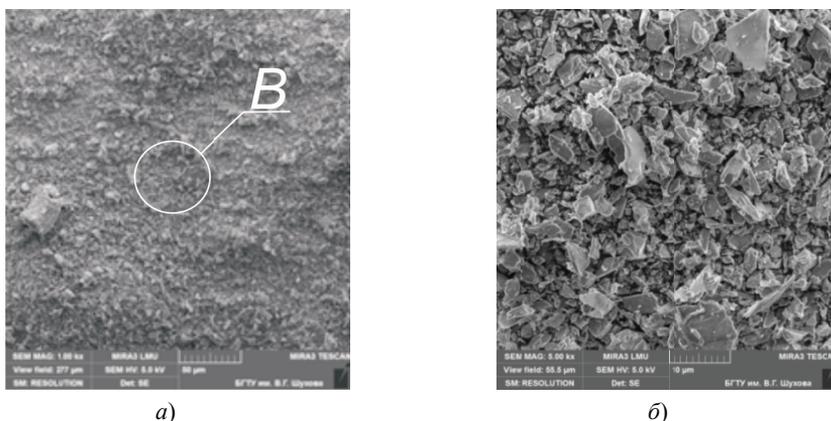


а)



б)

Рис. 6. Размер и форма частиц кварцито-песчаника, измельченного в центробежном помольно-смесительном агрегате:  
 а – локальный объект измельченных частиц; б – микрообъект «Б»



**Рис. 7. Микрочастицы кварцито-песчанника, измельченного в вихреакустическом диспергаторе:**

*a* – локальный объект частиц; *б* – микрообъект «B»

Проведенные конструкторско-технологические разработки патентозащищенных агрегатов и их испытания позволили разработать технологический комплекс для постадийного измельчения материалов с различными физико-механическими свойствами. Установлены рациональные режимы работы помольных агрегатов для получения тонкодисперсных материалов: в ПВИ (частиц размерами 200...500 мкм с микродефектной структурой); ЦПСА (частиц с размером 30...50 мкм); ВАД (частиц с размером < 20 мкм и удельной поверхностью частиц 1750...1890 м<sup>2</sup>/кг). Исследована микроструктура, размер и форма тонкодисперсных частиц, полученных с использованием разработанных агрегатов, объединенных в технологический комплекс для получения высокодисперсных материалов.

#### *Список литературы*

1. Клименко, В. Г. Активация основного доменного шлака продуктами термообработки природного гипса / В. Г. Клименко, А. В. Балахонов, М. Ю. Елистраткин // Химия и химическая технология. – 2010. – Т. 53, № 7. – С. 7 – 10.
2. Техника и технология предизмельчения материалов для производства нанокомпозитов / В. С. Севостьянов [и др.] // Нанотехнологии производству: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – 2007. – № 1. – С. 165 – 171.
3. Разработка и исследование энергосберегающего помольного оборудования для высокодисперсного измельчения материалов / С. В. Севостьянов [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2014. – № 3. – С. 76 – 80.
4. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
5. Пат. 2340398 Российская Федерация, С1 В02С 4/00. Пресс-валковый агрегат / А. М. Гридчин, В. С. Севостьянов, В. С. Лесовик, А. А. Романович, Г. М. Редькин, А. В. Колесников. – № 2007112760/03 ; заявл. 05.04.2007 ; опубл. 10.12.2008. Бюл. № 34.
6. Пат. 2277973 Российская Федерация, С1 В02С17/08. Помольно-смесительный агрегат / А. М. Гридчин, В. С. Лесовик, В. С. Севостьянов, В. И. Уральский, Е. В. Сеница. – № 2005118705/03 ; заявл. 24.06.2005 ; опубл. 20.06.2006. Бюл. № 17.
7. Севостьянов, В. С. Центробежный помольно-смесительный агрегат / В. С. Севостьянов, В. И. Уральский // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2005. – № 11. – С. 215 – 217.

8. Пат. 2226432 Российская Федерация, С1 В02С19/06. Вихреакустический диспергатор / В. С. Севостьянов, В. С. Лесовик, Д. Н. Перельгин, А. С. Горлов, С. П. Нечаев. – № 2003102929/032003102929/03 ; заявл. 31.01.2003 ; опубл. 10.04.2004. Бюл. № 10.

9. Севостьянов, В. С. Энергосберегающие помольные агрегаты / В. С. Севостьянов. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2006. – 435 с.

---

## Technological System and Units for Manufacturing of Fine and Ultrafine Materials

V. S. Sevostyanov<sup>1</sup>, V. I. Uralsky<sup>1</sup>, I. P. Boychuk<sup>2</sup>,  
D. N. Perelygin<sup>1</sup>, R. A. Ermilov<sup>1</sup>

*Departments of Technological Facilities, Machines and Mechanisms (1);  
Software for Computer Engineering and Automated Systems (2);  
V. G. Shukhov Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia;  
mehanikus@mail.ru*

**Keywords:** vortex-acoustic dispersant; stage milling; press roller shredder; technological system; fine product; centrifugal grinding and mixing unit.

**Abstract:** Ultrafine grinding of recyclable materials is one of the technological methods of improving the quality of products and expanding the range. The use of scientific and technical developments to create an energy-saving technological system and patent-protected machines for step-by-step grinding of materials ensures the development of innovative technologies for the production of new types of building materials and products.

### References

1. Klimentov V.G., Balakhonov A.V., Elistratkin M.Yu. [Activation of the main blast furnace slag with products of heat treatment of natural gypsum], *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Chemistry and Chemical Technology], 2010, vol. 16, no. 7, pp. 7-10. (In Russ.)

2. Sevost'yanov V.S., Strokova V.V., Ural'skii A.V., Perelygin D.N. [Technique and technology of pre-grinding of materials for the production of nanocomposites], *Nanotekhnologii proizvodstvu: sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Nanotechnology production: a collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference], 2007, no. 1, pp. 165-171. (In Russ.)

3. Sevost'yanov V.S., Perelygin D.N., Ural'skii V.I., Gorlov A.S., Glagolev E.S., Babaevskii A.N. [Development and research of energy-saving grinding equipment for high-dispersity grinding of materials], *Transactions of the Belgorod State Technical University*, 2014, no. 3, pp. 76-80. (In Russ.)

4. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoistva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow : Mashinostroeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)

5. Gridchin A.M., Sevost'yanov V.S., Lesovik V.S., Romanovich A.A., Red'kin G.M., Kolesnikov A.V. *Press-valkovyi agregat* [Press Roller Assembly], Russian Federation, 2008, Pat. 2340398. (In Russ.)

6. Gridchin A.M., Lesovik V.S., Sevost'yanov V.S., Ural'skii V.I., Sinitsa E.V. *Pomol'no-smesitel'nyi agregat* [Milling and mixing plant], Russian Federation, 2006, Pat. 2277973. (In Russ.)

7. Sevost'yanov V.S., Ural'skii V.I. *Tsentrobezhnyi pomol'no-smesitel'nyi agregat* [Centrifugal mixing and mixing unit], Transactions of the Belgorod State Technical University, 2005, no. 11, pp. 215-217. (In Russ.)

8. Sevost'yanov V.S., Lesovik V.S., Perelygin D.N., Gorlov A.S., Nechaev S.P. *Vikhre-akusticheskii dispergator* [Vortex-acoustic dispersant], Russian Federation, 2004, Pat. 2226432. (In Russ.)

9. Sevost'yanov V.S. *Energoberegayushchie pomol'nye agregaty* [Energy-saving grinding units], Belgorod : BGTU, 2006, 435 p.

---

### **Technologischer Komplex und Aggregate für Erhalten der feinteiligen und ultrafeinen Materialien.**

**Zusammenfassung:** Die ultrafeine Vermahlung der zu verarbeitenden Materialien ist eines der technologischen Verfahren, um die Qualität der Produkte zu verbessern und die Palette ihrer Produktion zu erweitern. Die Nutzung der wissenschaftlich-technischen Entwicklungen zur Schaffung eines energiesparenden technologischen Komplexes und patentrechtlich geschützter Aggregate für die schrittweise Vermahlung von Materialien sichert die Entwicklung innovativer Technologien für die Herstellung neuer Arten von Baustoffen und Produkten.

---

### **Ensemble technologique et agrégats pour l'obtention des matériaux de haute et ultra dispersité**

**Résumé:** Le broyage hyperfin de matériaux recyclables est une des techniques de l'augmentation de la qualité des articles produits et du développement de la gamme de la production. L'utilisation des études scientifiques et techniques sur la création du complexe technologique d'une économie d'énergie et des agrégats à brevets protégés du broyage par stades des matériaux assure le développement des technologies innovantes pour la production de nouveaux types de matériaux et des produits.

---

**Авторы:** *Севостьянов Владимир Семенович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологические комплексы, машины и механизмы»; *Уральский Владимир Иванович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; *Бойчук Игорь Петрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем»; *Перельгин Дмитрий Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; *Ермилов Родион Андреевич* – аспирант кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

**Рецензент:** *Уваров Валерий Анатольевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

УДК 621.914.5:62.231.3.003  
DOI: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.688-697

## ФОРМООБРАЗУЮЩИЕ ЦЕПИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ

В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; kafedra@mail.gaps.tstu.ru*

**Ключевые слова:** внутренние связи; генератор гидравлических импульсов; гидравлические связи; гидравлический шаговый двигатель; гидравлический шаговый привод; резьбофрезерные станки; формообразующие связи.

**Аннотация:** Рассмотрена возможность синтеза и оптимизации построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков различного технологического назначения в виде гидравлической синхронной связи на основе шагового гидропривода в целях применения агрегатно-модульного принципа для повышения точности, снижения металлоемкости, создания рациональной конструкции цепей станка.

---

### Введение

Тенденцией перспективного развития металлорежущих станков являются дальнейшее повышение точности обрабатываемых изделий путем снижения суммарной кинематической погрешности согласованного перемещения инструмента и заготовки, уменьшения влияния на точность обработки различных возмущающих воздействий; снижение металлоемкости; существенное увеличение производительности станков при интенсификации режимов обработки.

Кинематическая структура металлорежущего станка составлена из ряда кинематических групп: формообразования, деления, врезания, управления и вспомогательных движений. Основа структуры – группы формообразования. Кинематическая структура металлорежущего станка зависит от геометрической формы, размеров обрабатываемой поверхности и метода обработки, который оказывает влияние на нее в зависимости от числа и характера исполнительных формообразующих движений заготовки и инструмента.

Для получения в станке определенного исполнительного движения необходимо создать кинематическую связь между исполнительными звеньями станка – заготовкой и инструментом – и кинематическую связь данных звеньев с источником движения. Связи в большинстве случаев осуществляются с помощью механических звеньев как в цепях главного движения и подачи, так и во внутренних (формообразующих) цепях станков. Все цепи строятся как индивидуализированные конструкции для каждого типа станка, но различных габаритов и точности.

## **Характеристика механических внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков**

Механические кинематические цепи отличаются непостоянной жесткостью, обусловленной протяженностью цепи, жесткостью стыков в кинематических парах и их числом. Значительная протяженность кинематических цепей, особенно при сложном пространственном расположении рабочих органов, при большом числе промежуточных звеньев и значительном расстоянии между подвижными рабочими органами (узлами заготовки и инструмента) жесткие кинематические усложняются и снижают точность станка.

Использование механических кинематических связей во внутренних (формообразующих) цепях металлорежущих станков не удовлетворяет возрастающим требованиям повышения точности, жесткости, снижения металлоемкости, а особенно построению таких цепей по агрегатно-модульному принципу в станках различного технологического назначения и типоразмера. Это особенно необходимо в металлорежущих станках, имеющих сложные разветвленные многозвенные механические переналаживаемые цепи значительной протяженности, в которых требуется обеспечить жесткую функциональную связь для создания взаимосвязанных формообразующих движений заготовки и инструмента, таких как зубо- и резьбообрабатывающие станки. При проектировании и построении кинематических цепей, осуществляющих точные функционально связанные перемещения, необходимо предусмотреть меры для устранения зазоров между элементами кинематической цепи, особенно в конечных звеньях винтовых пар и червяных делительных передачах.

Кинематические цепи с механическими звеньями обеспечивают получение весьма точных передаточных отношений выходных звеньев и не требуют дополнительных поднастроек в процессе работы. Серьезным недостатком такого построения является то, что в каждом конкретном случае конструкция внутренних цепей строится как индивидуализированная для станков не только различного технологического назначения, но и одного типа и разного типоразмера.

Известные традиционные методы построения внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе механических связей и повышение их точности, которые сводятся к увеличению жесткости систем станков, выбору рациональной конструкции базовых деталей, повышению качества сборки и доводки узлов, достигли определенного предельного уровня влияния на точность станков и практически не имеет резервов повышения точности. Дальнейшие работы в этом направлении приводят к существенному повышению стоимости станка. Сокращение протяженности внутренних цепей станков возможно осуществить применением для их построения вместо механических связей гидравлических синхронных связей на основе шагового гидравлического привода, которые обеспечивают высокую точность согласованных угловых перемещений и возможность прямого непосредственного соединения исполнительного двигателя с нагрузкой, исключая промежуточные механические передачи, редукторы, коробки подач [1].

### **Применение гидравлических связей на основе шагового гидропривода для построения формообразующих цепей металлорежущих станков**

Построение внутренних (формообразующих) кинематических цепей металлорежущих станков различного технологического назначения в виде гидравлических связей на основе шагового гидропривода позволяет значительно упростить их кинематическую структуру путем сокращения протяженности механических цепей, исключив из них ряд промежуточных звеньев, а также улучшить техноло-

гичность конструкции, используя принцип агрегатно-модульного построения. Появляется возможность сблизить и удобно расположить согласуемые органы станка, повысить точность и жесткость кинематических, цепей значительно снизить металлоемкость их конструкций и станка в целом. В основе построения кинематических формообразующих цепей станков лежит гидромеханическая передача «гидравлический вал» [2, 3].

Гидравлический шаговый привод представляет собой систему из трех агрегатов (блоков): источника рабочей жидкости, управляющего (коммутирующего) устройства и силового исполнительного гидравлического шагового двигателя (ГШД). В качестве силового исполнительного органа в них используется специальный ГШД, выходной вал которого обрабатывает дискретные управляющие сигналы с высокой точностью и большим усилением по мощности. Звеном настройки такой передачи служит генератор гидравлических импульсов, который соединен с шаговым гидродвигателем трубопроводами, преобразует энергию рабочей жидкости в гидравлические импульсы и распределяет их в определенной последовательности по рабочим камерам ГШД. Скорость вращения и суммарный угол поворота выходного вала ГШД пропорциональны соответственно частоте и числу поданных управляющих импульсов.

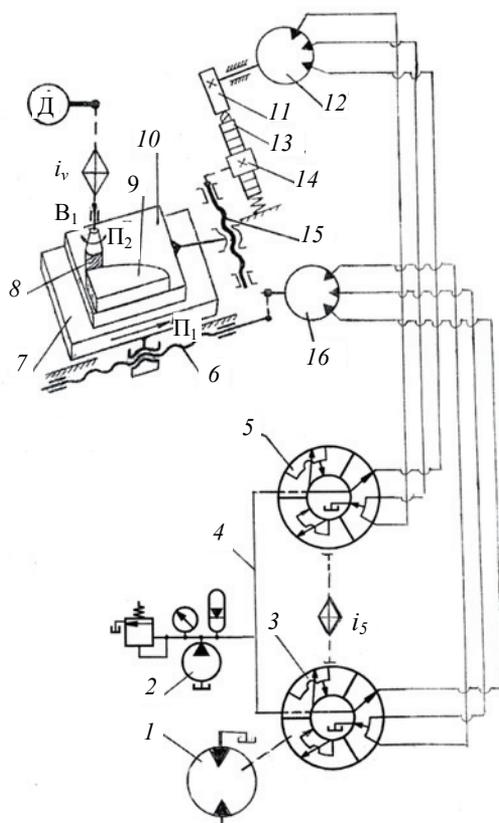
При использовании шагового гидропривода во внутренних цепях металло-режущих станков передаточное отношение между исполнительными органами гидравлической связи зависит от соотношения частот управляющих импульсов, формируемых генератором гидравлических импульсов (коммутирующим устройством) и подаваемых к исполнительным шаговым гидродвигателям приводов заготовки и инструмента. Так как для получения формообразующего движения необходимо обеспечить жесткую кинематическую связь между заготовкой и инструментом для осуществления требуемой функциональной зависимости между перемещениями рабочих органов, то из всех типов ГШД наиболее приемлемыми для применения во внутренних цепях станков являются двигатели с механической редукцией шага.

Используя особенности частотного регулирования скорости исполнительного ГШД и высокие компоновочные качества шагового гидропривода, представляется возможным применить гидравлические связи для построения внутренних (формообразующих) цепей станков, используя агрегатно-модульный принцип построения [4]. Рассмотрим структурные схемы станков различного технологического назначения, формообразующие цепи которых построены с использованием гидравлических связей на основе шагового гидропривода с разнообразными схемами коммутации потоков рабочей жидкости.

#### **Построение внутренних (формообразующих) цепей металлорежущих станков на основе шагового гидропривода**

На рисунке 1 представлена структурная схема копировально-фрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки сложных поверхностей с модифицированной системой управления. Станок включает в себя инструмент  $\delta$ , совершающий вращательное движение  $B_1$  от электродвигателя  $D$  через звено настройки  $i_v$ , заготовку  $9$ , установленную на столе  $7$  станка.

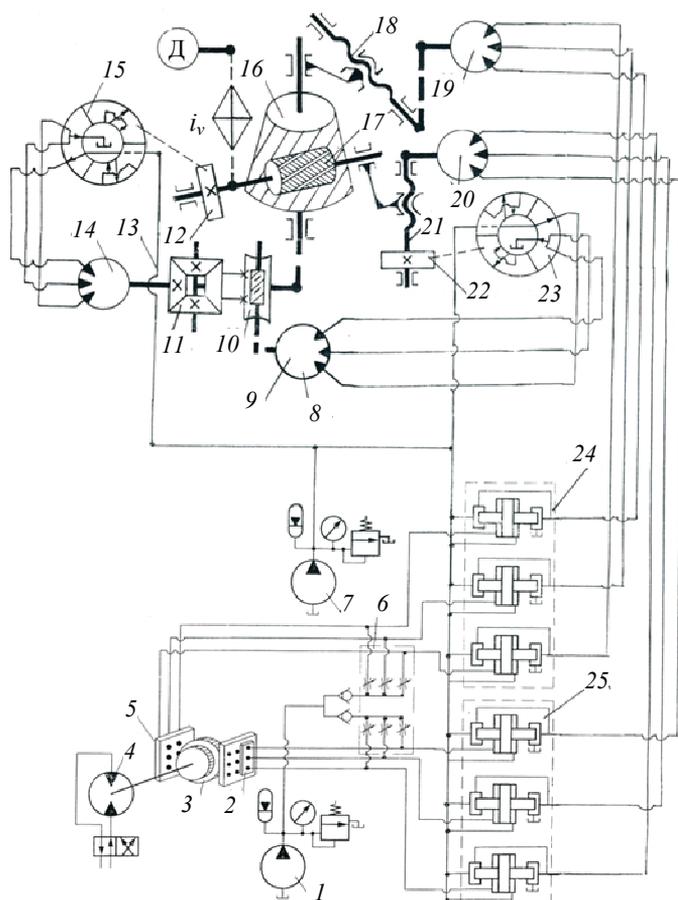
Сложное исполнительное движение составляется из элементарных прямолинейных движений – продольного  $P_1$  и поперечного  $P_2$ , для чего применяется сменный копир, рабочая поверхность которого обеспечивает закономерность неравномерного поперечного перемещения  $P_2$  в зависимости от продольного перемещения  $P_1$ .



**Рис. 1. Структурная схема копировально-фрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для обработки сложных поверхностей с модифицированной системой управления**

Продольное перемещение  $\Pi_1$  стола осуществляется от шагового гидродвигателя 16, кинематически связанного со столом посредством ходового винта 6 продольной подачи и управляемого генератором гидравлических импульсов 3, золотниковая втулка которого получает вращение от отдельного гидромотора 1. Поперечное перемещение  $\Pi_2$  верхних салазок 10 с заготовкой 9, необходимое для воспроизведения требуемой фасонной поверхности заготовки, обеспечивается внутренней (формообразующей) связью между продольным суппортом 7 и верхними салазками 10 и осуществляется от шагового гидродвигателя 12, кинематически связанного с механизмом, преобразующим равномерное дискретное вращение выходного вала шагового гидродвигателя 12 с закрепленным на нем сменным копиром 11 в неравномерное перемещение верхних салазок 10 и состоящим из кулачка, жестко закрепленного на ходовом винте 15 поперечной подачи верхних салазок 10 с изделием 9 и управляемого генератором гидравлических импульсов 5, золотниковая втулка которого получает вращение от золотниковой втулки генератора гидравлических импульсов 3 цепи продольного перемещения продольного стола 7 станка. Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов поступает от насосной установки 2 по трубопроводу 4.

На рисунке 2 представлена структурная схема зубофрезерного станка с гидравлическими внутренними связями для нарезания конических колес с косыми (тангенциальными) зубьями червячной модульной фрезой методом обката с системой управления, построенной на базе двухкромочного золотника с торцовым распределением рабочей жидкости.



**Рис. 2. Структурная схема зубофрезерного станка с гидравлическими внутренними связями для нарезания конических колес с косыми (тангенциальными) зубьями червячной модульной фрезой методом обката**

Станок включает в себя инструмент *17*, совершающий вращательное движение от электродвигателя *Д* через звено настройки *i<sub>v</sub>*, заготовку *16*, взаимодействующую с инструментом по цепи обката и получающую вращение от гидравлического шагового двигателя *14*, кинематически связанного со шпинделем заготовки и управляемого генератором гидравлических импульсов *15*, золотниковая втулка которого получает вращение от зубчатого колеса *12*, закрепленного на шпинделе инструмента *17*. Вертикальная подача инструмента осуществляется от гидравлического шагового двигателя *20*, кинематически связанного с ходовым винтом *21* вертикальной подачи инструмента. Радиальное перемещение стола с заготовкой, связанное определенной зависимостью с вертикальным перемещением инструмента, необходимое для воспроизведения наклонной образующей при обработке зубьев, расположенных на конической поверхности, осуществляется шаговым гидродвигателем *19*, кинематически связанным со столом посредством ходового винта *18* радиальной подачи.

Дифференциальное движение, необходимое для обеспечения дополнительного поворота заготовки при нарезании конических колес с тангенциальными зубьями, осуществляется шаговым гидродвигателем *9*, кинематически связанным с заготовкой через суммирующий механизм *11* в виде дифференциала с кониче-

скими колесами посредством червячной передачи 10 на управляемом генераторе гидравлических импульсов 23, золотниковая втулка которого получает вращение от зубчатого колеса 22, закрепленного на ходовом винте 21 вертикальной подачи фрезерного суппорта с инструментом. Управление шаговыми гидродвигателями 19 и 20 приводов радиальной подачи стола с заготовкой 16 и вертикальной подачи инструмента 17 осуществляется гидродвигателем с торцовым распределением рабочей жидкости от блоков 24 и 25, выполненных на базе двухкромочного золотника.

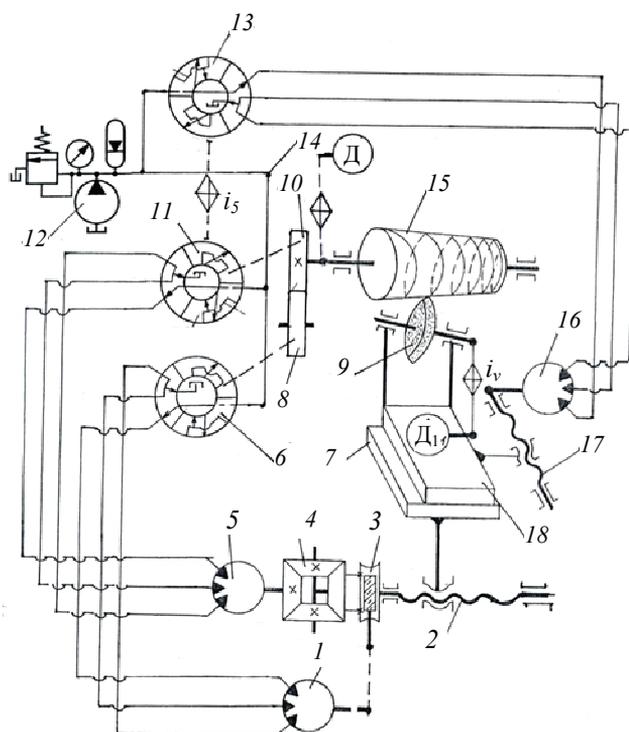
Настройка цепей радиальной подачи стола с заготовкой и вертикальной подачи инструмента на требуемое передаточное отношение для обеспечения величины конусности производится генератором гидравлических импульсов 3, который представляет собой устройство, выполненное в виде набора кодирующих дисков, закрепленных на общей оси и получающих вращение от отдельного гидромотора 4. Количество таких кодирующих дисков в генераторе определяет общее число передаточных отношений гидравлической связи.

В момент, когда выступ вращающегося диска генератора гидравлических импульсов находится напротив рабочей щели и перекрывает ее, происходит скачкообразное повышение управляющего давления в междроссельной камере, в результате чего происходит переключение гидрораспределителя. При отсутствии управляющего сигнала (импульса давления) распределитель находится в левом положении под действием давления питания. Рабочая жидкость для получения управляющих импульсов для гидрораспределителей с торцовым распределением рабочей жидкости поступает от насосной установки 1 через блок управляемых дросселей 6. Генератор гидравлических импульсов обеспечивает постоянное для данной настройки отношение частот гидравлических импульсов давления, а следовательно, частот вращения выходных валов гидравлических шаговых приводов радиальной подачи заготовки и вертикальной подачи инструмента.

Коммутация потоков рабочей жидкости по силовым каналам и рабочим камерам ГШД зависит от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент выступом вращающегося кодирующего диска генератора гидравлических импульсов. Передаточное отношение между исполнительными шаговыми двигателями 19 и 20 гидравлической связи зависит от соотношения частот гидравлических импульсов, формируемых генератором гидравлических импульсов и подаваемых к исполнительным силовым шаговым двигателям, которые приводят во вращение заготовку и ее поступательное перемещение для обеспечения жесткой кинематической связи, и определяется числом гидравлических импульсов, подаваемых за один оборот блока кодирующих дисков генератора гидравлических импульсов.

Изменение передаточного отношения цепи обката (деления) производится перемещением ползушек 2 на корпусе генератора гидравлических импульсов относительно периферии кодирующего диска с различным числом выступов, осуществляя коммутацию потоков рабочей жидкости по силовым каналам в зависимости от того, какая щель управляющих каналов перекрыта в данный момент времени выступом вращающегося диска генератора импульсов. Давление питания на вход каждого из гидрораспределителей подается через регулируемый дроссель блока дросселей 6 от насосной установки 7, а затем, в зависимости от положения торцовых гидрораспределителей, по одному из каналов поступает в рабочие камеры шаговых гидродвигателей 19 и 20 приводов радиальной подачи стола с заготовкой и вертикальной подачи инструмента.

На рисунке 3 приведена структурная схема резбобфрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания длинных конических винтовых поверхностей переменного шага [5, 6] с модифицированным механизмом приращения шага.



**Рис. 3. Структурная схема резбифрезерного станка с гидравлическими формообразующими связями для нарезания длинных конических винтовых поверхностей переменного шага с модифицированным механизмом приращения шага**

Станок включает в себя инструмент 9 – дисковая фреза с профилем, соответствующим профилю нарезаемой винтовой поверхности и совершающим вращательное движение от электродвигателя  $D_1$  через звено настройки  $i_v$ , и заготовку 15, которая совершает вращение (движение круговой подачи) от электродвигателя  $D$  через звено настройки.

Резбифрезерный станок для обработки конических винтовых поверхностей переменного шага включает в себя кинематическую цепь вращения шпинделя с заготовкой (движение круговой подачи), кинематическую цепь начального шага, связывающую между собой вращение шпинделя с заготовкой и продольное перемещение суппорта с фрезерной головкой, цепь изменения шага винтовой поверхности, связывающая цепь начального шага и суммирующий механизм, задающий закон изменения шага, выполненного в виде дифференциала из конических колес.

Формообразование винтовой линии переменного шага осуществляется в результате сложения двух движений: равномерного продольного перемещения суппорта по кинематической цепи начального шага и дополнительного перемещения по цепи приращения шага посредством суммирующего механизма, выполненного в виде дифференциала с коническими колесами. Продольное перемещение суппорта 7 с фрезерной головкой, несущей инструмент 9 (цепь начального шага винтовой поверхности), осуществляется от шагового гидродвигателя 5, кинематически связанного с суппортом 18 посредством ходового винта 2 продольной подачи и управляемого генератором гидравлических импульсов 11, золотниковая втулка которого передает импульсы от приводного зубчатого колеса 10, жестко закрепленного на шпинделе заготовки 15. Поперечное перемещение верхних салазок 18

с инструментом 9, связанное определенной зависимостью с продольным перемещением продольного суппорта 7 для конической винтовой наклонной поверхности, производимое шаговым гидродвигателем 16, кинематически связанным с ходовым винтом 17 поперечной подачи верхних салазок 18 и управляемым генератором гидравлических импульсов 13, золотниковая втулка которого получает вращение от генератора гидравлических импульсов 11, управляемого шаговым гидродвигателем 5 цепи продольного перемещения продольного суппорта 7 через несилую гитару сменных зубчатых колес  $i_s$ .

Дополнительное перемещение суппорта с инструментом, обеспечивающее необходимую величину приращения шага винтовой поверхности, осуществляется от шагового гидродвигателя 1, кинематически связанного посредством червячной передачи 3 с суммирующим механизмом 4, выполненным в виде дифференциала с коническими колесами и управляемым генератором гидравлических импульсов 6, золотниковая втулка с рабочими щелями которого получает вращение от шпинделя заготовки 15 через зубчатую передачу 8, 10.

Рабочая жидкость к генераторам гидравлических импульсов подается от насосной установки 12 по трубопроводу 14.

### Заключение

Эффективность использования во внутренних цепях станков гидравлических связей на основе шагового гидропривода с силовыми исполнительными ГШД по сравнению с использованием традиционных механических цепей достигается за счет следующих основных факторов:

1) обеспечения конструктивной однородности внутренних кинематических связей между конечными звеньями цепей – заготовкой и инструментом для станков различного технологического назначения и разных типоразмеров;

2) уменьшения металлоемкости и массы станка за счет сокращения до возможного минимума числа промежуточных звеньев, составляющих механическую кинематическую цепь;

3) обеспечения конструктивной преемственности при создании станков благодаря типизации конструкции внутренних кинематических цепей на основе гидравлической связи в виде шагового гидропривода;

4) реализации агрегатно-модульного принципа проектирования и построения внутренних кинематических цепей металлорежущих станков [7, 8].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-48-680787).*

### Список литературы

1. Колодин, А. Н. Затыловочные станки с гидравлическими формообразующими связями: монография / А. Н. Колодин, В. А. Ванин, А. А. Родина. Deutschland : LAP Lambert Academic Publishing, 2015. – 169 с.

2. Ванин, В. А. Станки с гидравлическими внутренними (формообразующими) связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей / В. А. Ванин, А. Н. Колодин // Справочник. Инженерный журнал с приложениями. – 2012. – № 7 (184). – С. 30 – 35.

3. Металлорежущие станки с гидравлическими связями на основе шагового гидропривода во внутренних (формообразующих) цепях / В. А. Ванин [и др.] / Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2013. – Т. 19, № 1. – С. 167 – 176.

4. Применение шагового гидропривода для построения формообразующих цепей металлорежущих станков со сложными движениями формообразования / В. А. Ванин [и др.] // Вопросы соврем. науки и практики. Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2014. – № 1 (50). – С. 250 – 259.

5. Ванин, В. А. Резьбообрабатывающие станки с гидравлическими формообразующими связями на основе шагового гидропривода для обработки винтовых поверхностей переменного шага / В. А. Ванин, А. Н. Колодин, А. А. Родина // Вестн. машиностроения. – 2014. – № 7. – С. 37 – 45.

6. Vanin, V. A. Modular Design Based on Hydraulic Step Drives for Internal Kinematic Chains in Metal-Cutting Machines / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – No. 30 (12). – P. 1248 – 1251.

7. Vanin, V. A. Application of Hydraulic Step Drives in Metal-Cutting Machine Tools / V. A. Vanin, A. N. Kolodin // Russian Engineering Research. – 2010. – No. 30 (5). – P. 446 – 450.

8. Vanin, V. A. Kinematic Structure of Metal-Cutting Machines with Hydraulic Couplings / V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina // Russian Engineering Research. – 2015. – No. 34 (12). – P. 763 – 768.

---

## Forming Chains of Metal-Cutting Machines Based on Hydraulic Connections

V. A. Vanin, A. N. Kolodin, A. A. Rodina

*Department of Computer Integrated Systems in Mechanical Engineering,  
TSTU, Tambov, Russia; kafedra@mail.gaps.tstu.ru*

**Keywords:** internal communications; generator of hydraulic impulses; hydraulic connections; hydraulic stepper motor; hydraulic stepper drive; thread-milling machines; forming connections.

**Abstract:** The paper explores the possibility of synthesis and optimization of the constructing internal (forming) chains of metal-cutting machines of various technological purposes in the form of hydraulic synchronous coupling based on the stepping hydraulic drive; the possibility of applying a modular principle to improve accuracy, reduce metal consumption, and create a rational design of machine chains is considered.

### References

1. Kolodin A.N., Vanin V.A., Rodina A.A. *Zatylovochnyestanki s gidravlicheskimimi formoobrazuyushchimi svyazyami* [Backing machines with hydraulic formative relationships], Deutschland: LAP Lamber Academic Publishing, 2015, 169 p. (In Russ.)

2. Vanin V.A., Kolodin A.N. [Machines with hydraulic internal (formative) linkages based on hydraulic stepper for processing screw surfaces], *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal s prilozheniyami* [Handbook. An Engineering journal with Applications], 2012, no. 7 (184), pp. 30-35. (In Russ.)

3. Vanin V.A., Kolodin A.N., Do M.Z., Damap M.M. [Metal-cutting machines with hydraulic connections on the basis of a step-type hydraulic drive in internal (forming) chains], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 167-176. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Vanin V.A., Kolodin A.N., Averin A.S., Khramova N.A. [Application of the hydraulic drive for the construction of stepper shaping circuits of machine tools with complex movements shaping], *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*, 2014, no. 1(50), pp. 250-259. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A. [Threading machines with hydraulic forming connections on the basis of a stepping hydraulic drive for processing screw surfaces of variable pitch], *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Machine Building], 2014, no. 7, pp. 37-45. (In Russ.)

6. Vanin V.A., Kolodin A.N. Modular design based on hydraulic step drives for internal kinematic chains in metal-cutting machines, *Russian Engineering Research*, 2010, no. 30 (12), pp. 1248-1251.

7. Vanin V.A., Kolodin A.N. Application of hydraulic step drives in metal-cutting machine tools, *Russian Engineering Research*, 2010, no. 30 (5), pp. 446-450.

8. Vanin V.A., Kolodin A.N., Rodina A.A. Kinematic structure of metal-cutting machines with hydraulic couplings, *Russian Engineering Research*, 2015, no. 34 (12), pp. 763-768.

---

### **Formgebende Ketten der metallschneidenden Werkzeugmaschinen auf Basis der hydraulischen Bindungen**

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit der Synthese und Optimierung der Konstruktion der inneren (formgebenden) Ketten der metallschneidenden Werkzeugmaschinen verschiedener technologischer Zwecke in Form hydraulischer synchroner Kommunikation auf der Basis eines Schritthydraulikantriebs mit dem Ziel der Anwendung des aggregatmodularen Prinzips in Betracht gezogen, um die Genauigkeit zu erhöhen, den Metallverbrauch zu reduzieren und eine rationelle Konstruktion der Maschinenketten zu schaffen.

---

### **Circuits des machines-outils travaillant le métal par formage à la base de liens hydrauliques**

**Résumé:** Est envisagée la possibilité de la synthèse et de l'optimisation de la construction des circuits internes (qui donnent une forme) des machines-outils travaillant le métal par formage de la diverse destination technologique en tant que le lien hydraulique synchrone à la base de la commande hydraulique pas à pas dans le but de l'application du principe d'agrégat et de module pour l'augmentation de la précision, la réduction du content du métal, la création de la conception rationnelle des circuits de la machine.

---

**Авторы:** *Ванин Василий Агафонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Колодин Андрей Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении»; *Родина Антонина Александровна* – старший преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**ИЗОТЕРМЫ АДСОРБЦИИ ИОНОВ СВИНЦА (II)  
ГРАФЕНОВЫМИ НАНОКОМПОЗИТАМИ**

**А. Е. Кучерова<sup>1</sup>, И. В. Буракова<sup>1</sup>, А. Е. Бураков<sup>1</sup>, К. В. Брянкин<sup>2</sup>**

*Кафедры: «Техника и технологии производства нанопродуктов» (1);  
anastasia.90k@mail.ru; «Химия и химические технологии» (2),  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** адсорбция; графеновые материалы; изотермы; ионы тяжелых металлов; классификация Смита; уравнение Ленгмюра; уравнение Фрейндлиха.

**Аннотация:** Исследована адсорбция ионов свинца (II) на графеновых материалах. Исследования равновесия проводились с использованием моделей Фрейндлиха, Ленгмюра. Применимость двух изотерм говорит о том, что возможны как монослойная адсорбция, так и гетерогенное энергетическое распределение активных центров на поверхности адсорбента. Максимальная экспериментальная адсорбционная емкость по отношению к свинцу (II) для паст многослойного и малослойного графенов равна 230 и 170 мг/г соответственно. Дано обоснование применения разработанных графеновых композитов для удаления тяжелых металлов из промышленных стоков.

---

В связи со стремительно развивающейся индустриализацией человеческого общества различные загрязнители, такие как ионы тяжелых металлов, органические вещества, бактерии, вирусы и т. д., попадают в сточные воды, нанося серьезный вред здоровью человека. Среди всех вредных компонентов, содержащихся в воде, ионы тяжелых металлов из ряда Pb (II), Cd (II), Zn (II), Ni (II) и Hg (II) обладают наиболее высокими токсическими и разрушающими свойствами, которые могут вызывать серьезные проблемы со здоровьем у людей и животных. Например, свинец представляет риск для здоровья человека, вызывая бессонницу, боль, головокружение, анемию, раздражительность, мышечную слабость, галлюцинации и почечную недостаточность [1].

Присутствие вышеупомянутых тяжелых металлов в водных системах представляет серьезную экологическую проблему. В связи с этим предложены различные методы их удаления, такие как ионный обмен, мембранная фильтрация, коагуляция, флокуляция, флотация и электрохимические способы [2], среди которых наиболее эффективным является адсорбция, которая широко используется в методах разделения [3], очистке сточных вод [4], охлаждении, контроле окружающей среды и устройстве жизнеобеспечения в космических аппаратах и, очевидно,

гетерогенном катализе [5]. Среди широкого класса традиционных адсорбционных материалов (активированные угли различной химической природы, природные и синтетические цеолиты, глины и т.д.) используются новые перспективные поглотители на основе углеродных наноструктур, такие как углеродные нанотрубки различных модификаций, фуллерены, оксид графена и их возможные сочетания.

Графен, новый углеродный наноматериал, обладающий уникальными физическими, химическими, электрическими и механическими свойствами [6–9]. За счет высокой адсорбционной способности и быстрой скорости поглощения, он является наиболее перспективным материалом для удаления тяжелых металлов из водных растворов [10–13].

Учитывая вышесказанное, необходимо разработать новые графеновые материалы для эффективного извлечения свинца (II) из водных растворов.

Электронные изображения образцов на основе графена получены с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на двухлучевом приборе Neon 40 (Carl Zeiss, Йена, Германия) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на приборе JeM-200CX (JEOL, Токио, Япония). Равновесную концентрацию свинца (II) в водных растворах определяли атомно-абсорбционной спектрометрией на приборе МГА-915МД (ООО «Атомприбор», Санкт-Петербург, Россия).

### Экспериментальная часть

Графеновые композиты представляют собой водную пасту, содержащую многослойный или малослойный графены. Графеновые пасты синтезировались согласно методике, представленной в работе [14]. Графит интеркалировали раствором персульфата аммония в серной кислоте, затем выдерживали 3 ч при 40 °С для расширения, после чего проводили гидролиз и промывали водой до удаления кислоты. Добавление поверхностно-активных веществ (ПАВ) способствует образованию малослойного графена. Как правило, массовое содержание графена в пасте многослойного графена (ПМНГ) составляло 5 %, а в пасте малослойного графена (ПМАГ) – 12 % в расчете на графеновый углерод. Графен содержал около 10 % масс. окисных групп по отношению к графеновому углероду.

Типичные изображения СЭМ и ПЭМ ПМНГ представлены на рис. 1, откуда видно, что размер нанопластинок составляет порядка 5...10 нм, а число слоев 15–25.

Как показано на рис. 2, ПМАГ представляет собой малослойные нанопластины графена размером порядка 5...10 нм и с числом слоев 3–5.

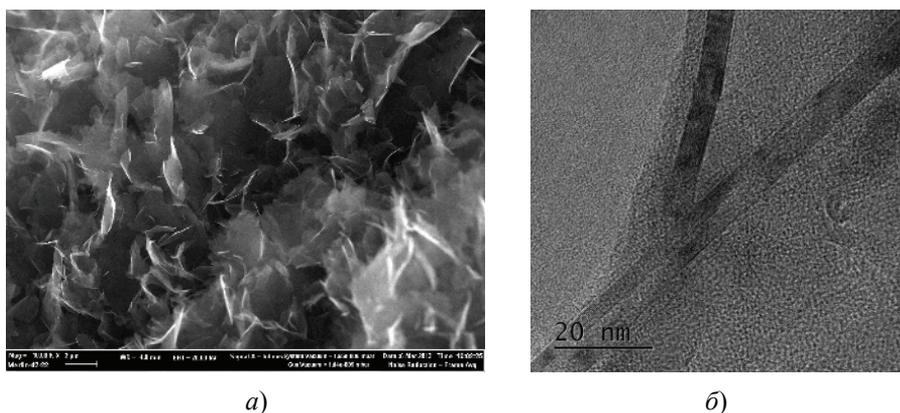


Рис. 1. Изображения СЭМ (а) и ПЭМ (б) ПМНГ

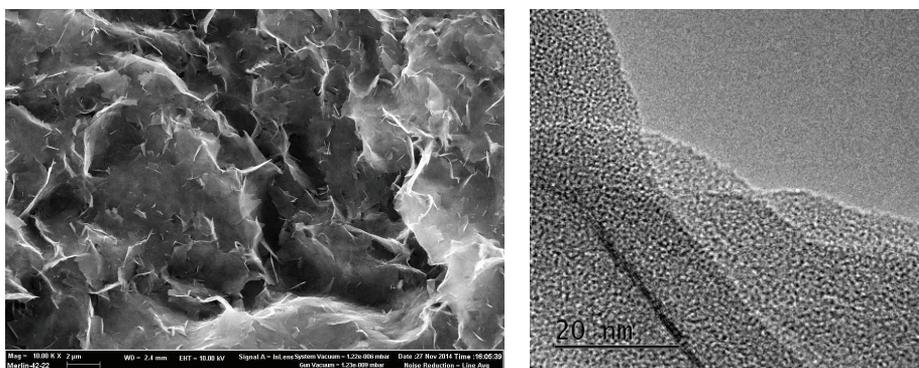


Рис. 2. Изображения СЭМ (а) и ПЭМ (б) ПМАГ

### Методика исследования

Экспериментальное изучение процесса адсорбции ионов свинца (II) из водных растворов проводили на графеновых материалах (ПМНГ, ПМАГ). В серию из 7 пробирок объемом 50 мл, содержащих сорбент, вносили с помощью пипетки Пастера 15 мл раствора нитрата свинца ( $Pb(NO_3)_2$  концентрацией: 200, 500, 700, 1000, 1700, 2400, 3500 мг/л, содержимое пробирок встряхивали при 100 об/мин в ротаторах BioRS-24 (Biosan, Рига, Латвия) в течение равновесного времени сорбента. По окончании процесса сорбции растворы центрифугировали (Centrifuge 5810 R (Эппендорф, Гамбург, Германия)) на скорости 10000 об/мин в течение 10 минут, в целях разделения фаз. Затем с помощью пипетки Пастера жидкую фазу помещали в пробирки объемом 30 мл, не допуская попадания в них твердой фазы и ее взвеси. После чего растворы измеряли методом количественного элементного анализа по атомным спектрам поглощения на атомно-абсорбционном спектрометре.

Равновесная адсорбционная способность  $q_e$ , мг/г, металла рассчитывалась с использованием баланса массы по формуле

$$q_e = (C_0 - C_e)V/m, \quad (1)$$

где  $C_0$ ,  $C_e$  – начальная и равновесная концентрации свинца (II) в растворе, мг/л;  $V$  – объем образца, л;  $m$  – масса адсорбентов, г.

### Результаты и обсуждение

Чтобы оптимизировать процесс удаления адсорбата, важно установить наиболее подходящую корреляцию для равновесных данных. В соответствии с экспериментальными результатами были реализованы две модели изотерм адсорбции – Ленгмюра и Фрейндлиха. Модель Ленгмюра предполагает, что адсорбция происходит на определенных однородных участках, расположенных на поверхности адсорбента. Его форма приведена в уравнении

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{b C_e + 1}, \quad (2)$$

где  $q_{\max}$  – максимальная адсорбционная емкость монослоя, мг/г;  $b$  – постоянная Ленгмюра для данной пары «адсорбент – адсорбат», величина (отношение констант скоростей десорбции и адсорбции), численно равная концентрации адсорбата, при которой занята половина активных центров.

Модель Фрейндлиха, которая может быть применена для адсорбции на гетерогенных поверхностях в нескольких слоях, выражается уравнением

$$q_e = k_f(C_e)^{1/n}, \quad (3)$$

где  $k_f$  – константа равновесия, которая указывает на адсорбционную емкость;  $n$  – для  $1/n = 1$  адсорбция линейная,  $1/n < 1$  означает, что адсорбция имеет химический характер, а если  $1/n > 1$ , адсорбция благоприятная и физической природы.

Несмотря на то что разработаны и использованы многие другие модели для описания изотерм [16], можно видеть, что изотермы Ленгмюра и Фрейндлиха по-прежнему остаются двумя наиболее часто используемыми уравнениями равновесной адсорбции из-за их простоты и легкости оценки их регулируемых параметров. Как видно на рис. 3, изотермы могут быть хорошо аппроксимированы прямыми линиями, тем самым подтверждая применимость как модели Ленгмюра, так и модели Фрейндлиха для описания адсорбции свинца (II) на всех исследованных графеновых материалах.

При изучении изотерм адсорбции на ПМНГ и ПМАГ можно сделать предположение, что они соответствуют кривой класса  $L$ . На рис. 4 просматривается выгнутый начальный участок относительно оси концентраций, что говорит об образовании мономолекулярного слоя. Наличие второго плато после насыщения адсорбционного слоя, что характерно для изотерм IV типа, может быть обусловлено полимолекулярной адсорбцией [17 – 19].

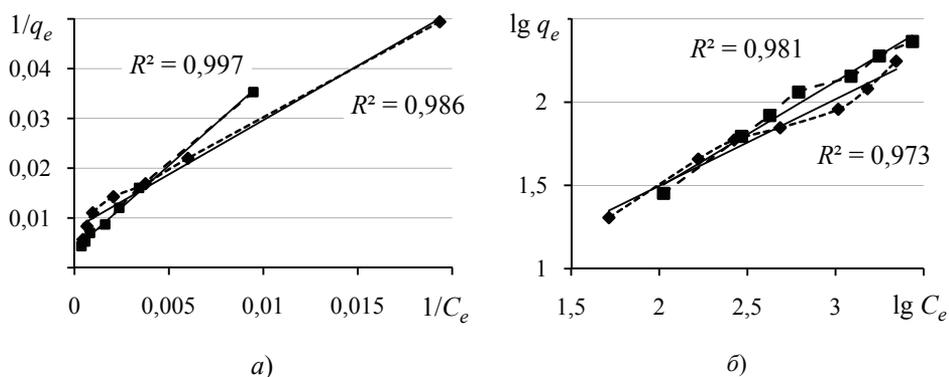


Рис. 3. Изотермические кривые Ленгмюра (а) и Фрейндлиха (б):  
 -■- - ПМНГ; ...◆... - ПМАГ

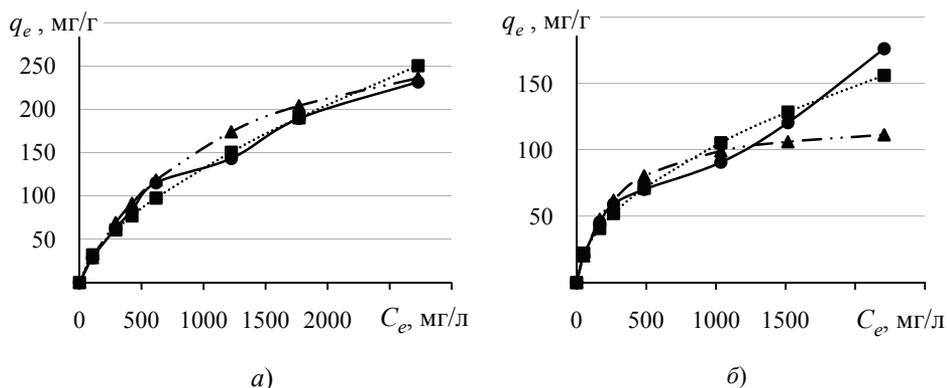


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические изотермы адсорбции свинца (II) на ПМНГ (а) и ПМАГ (б):  
 -●- - эксперимент; -▲- - Ленгмюр; -■- - Фрейндлих

Из изотермических исследований (табл. 1) установлено, что все кривые хорошо согласуются с экспериментальными данными, указывая тем самым на эффективность графеновых материалов, используемых в качестве адсорбентов тяжелых металлов. Отметим, что максимальная экспериментальная адсорбционная способность исследуемых материалов изменяется в следующей последовательности: ПМНГ > ПМАГ.

Сравнивая коэффициенты корреляции  $R^2$  для двух используемых моделей, можно видеть, что их значения соизмеримы. Это указывает на то, что адсорбция свинца (II) на графеновых материалах носит комплексный характер, в частности, из-за наличия активных центров с различной энергией связи на поверхности адсорбента.

В диапазоне малых концентраций (200...700 мг/л) предпочтительно использовать модель Ленгмюра. На основании полученных значений констант адсорбционного равновесия данного уравнения можно предположить, что ионы свинца (II) в их малых концентрациях взаимодействуют с активными сорбционными центрами, расположенными на поверхности исследуемых материалов и ответственными за физическую адсорбцию. Диапазон высоких концентраций не удовлетворяет граничным условиям применимости модели Ленгмюра с мономолекулярным сорбционным механизмом, а активная адсорбция в данном диапазоне может служить основой для косвенного подтверждения применимости модели Фрейндлиха.

Согласно полученным значениям  $1/n$ , можно предположить благоприятные условия для химической адсорбции, так как  $1/n < 1$ . Данный тип адсорбции связан с энергетической неоднородностью адсорбционных центров. На основе систематизации приведенных результатов предложены рекомендации по использованию графеновых материалов в процессах жидкофазной сорбции ионов свинца (II). Полученные эмпирические зависимости (табл. 2) позволяют прогнозировать параметры сорбционного процесса.

Таблица 1

**Константы изотерм адсорбции свинца (II),  
полученные на материалах ПМНГ и ПМАГ**

Материал	Константы Ленгмюра			Константы Фрейндлиха		
	$q_{\max}$	$b$	$R^2$	$k_f$	$1/n$	$R^2$
ПМНГ	333,33	$8,89 \cdot 10^{-4}$	0,997	1,659	0,634	0,981
ПМАГ	250	$3,45 \cdot 10^{-4}$	0,989	2,850	0,520	0,908

Таблица 2

**Уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха,  
полученные на основе экспериментальных данных**

Материал	Уравнение Ленгмюра	Уравнение Фрейндлиха
ПМНГ	$q_e = \frac{333,33 \cdot 8,89 \cdot 10^{-4} C_e}{8,89 \cdot 10^{-4} C_e + 1}$	$q_e = 1,659(C_e)^{0,634}$
ПМАГ	$q_e = \frac{250 \cdot 3,45 \cdot 10^{-4} C_e}{3,45 \cdot 10^{-4} C_e + 1}$	$q_e = 2,85(C_e)^{0,52}$

## Заключение

Проведенное исследование показало высокую адсорбционную способность графеновых материалов по отношению к тяжелым металлам в водных растворах, а также подтвердило потенциал использования их в качестве эффективных адсорбентов для извлечения металлических загрязнителей из жидкой фазы как при малых, так и высоких концентрациях. Данный результат может иметь большое значение для промышленной очистки сточных вод. Максимальная сорбционная способность к свинцу (II) при н.у. составила 230 мг/г, следовательно, обширные исследования в этой области необходимы для развития данного экологического направления.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проекта государственного задания ГК № 16.1384.2017/ПЧ.*

### Список литературы

1. Naseem, R. Removal of Pb(II) from Aqueous Solution by Using Bentonite as an Adsorbent / R. Naseem, S.S. Tahir // Water Research. – 2001. – Vol. 35. – P. 3982 – 3986.
2. Fu., F. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A review / F. Fu., Q. Wang // Journal of Environmental Management. – 2011. – Vol. 92, No. 3. – P. 407 – 418.
3. Sudhakar, Y. Removal of Endosulfan Using Aerobic Mixed Bacterial Culture / Y. Sudhakar, A. K. Dikshit // International Journal of Environmental Pollution. – 2001. – Vol. 15. – P. 543 – 552.
4. Radovic, L. R. Carbon Materials as Adsorbents in Aqueous Solutions / L. R. Radovic, C. Moreno-Castilla, F. Rivera-Utrilla // Chemistry and Physics of Carbon. – 2001. – Vol. 27. – P. 227 – 405.
5. Carbon Materials in Environmental Applications / F. Derbyshire [et al.] // Chemistry and Physics of Carbon. – 2000. – Vol. 27. – P. 1 – 66.
6. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films / K. S. Novoselov [et al.] // Science. – 2004. – Vol. 306. – No. 5696. – P. 666 – 669.
7. Gomez-Navarro, C. Atomic Structure of Reduced Graphene Oxide / C. Gomez-Navarro, M. Burghard, K. Kern // Nano Letters. – 2008. – Vol. 8. – P. 2045 – 2049.
8. Graphene Oxide Papers Modified by Divalent Ions-Enhancing Mechanical Properties Via Chemical Cross-Linking / S. Park [et al.] // ACS Nano. – 2008. – Vol. 2, No. 3. – P. 572 – 578.
9. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene / A. A. Balandin [et al.] // Nano Letters. – 2008. – Vol. 8, No. 3. – P. 902 – 907.
10. Chandra, C. Highly Selective Adsorption of  $Hg^{2+}$  by a Polypyrrole-Reduced Graphene Oxide Composite / C. Chandra, K. S. Kim // Chemical Communication. – 2011. – Vol. 47. – P. 3942 – 3944.
11. The Adsorption Properties of Pb (II) and Cd (II) on Functionalized Graphene Prepared by Electrolysis Method / X. Deng [et al.] // Journal Hazards Materials – 2010. – Vol. 183. – P. 923 – 930.
12. Folding/Aggregation of Graphene Oxide and Its Application in  $Cu^{2+}$  Removal / S.T. Yang [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. – 2010. – Vol. 351, Issue 1. – P. 122 – 127.

13. Fabrication of Highly Porous Biodegradable Monoliths Strengthened by Graphene Oxide and Their Adsorption of Metal Ions / N. Zhang [et al.] // *Carbon*. – 2011. – Vol. 49, Issue 3. – P. 827 – 837.
14. Melezhyk, A. V. Synthesis of Graphene Nanoplatelets from Peroxosulfate Graphite Intercalation Compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2014. – Vol. 5, No. 2. – P. 294 – 306.
15. Graphene-Based Nano-composites for Enhanced Pb<sup>2+</sup> Adsorption / A. E. Kucherova [et al.] // *Nano hybrids and composites*. – 2016. – Vol. 13. – P. 323–329.
16. Kumar, K. V. Pseudo Second Order Kinetics And Pseudo Isotherms for Malachite Green onto Activated Carbon: Comparison of Linear and Non-Linear Regression Methods / K. V. Kumar, S. Sivanesan // *Journal of Hazards Materials B*. – 2006. – Vol. 136. – P. 721 – 726.
17. Adsorption from Solution at the Solid/Liquid Interface / G. D. Parfitt, C. H. Rochester (Ed.). – London : Academic press, 1983. – 475 p.
18. Mukhin, V.M. Active Carbon as Nanoporous Material for Solving Environmental Problem / V. M. Mukhin, I. V. Burakova, A. E. Burakov // *Advanced Materials & Technologies*. – 2017. – No. 2. – P. 50 – 56. doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.050-056
19. Технологические основы функционализации многостенных углеродных нанотрубок стеаратом титана для последующего производства композитов / А. Г. Ткачев [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 501 – 509. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.501-509

---

## Graphene Composites for Lead (II) Extraction: an Equilibrium Study

A. E. Kucherova<sup>1</sup>, I. V. Burakova<sup>1</sup>, A. E. Burakov<sup>1</sup>, K. V. Bryankin<sup>2</sup>

*Department of Technology and Methods of Nanoproducts Manufacturing (1); anastasia.90k@mail.ru; Department of Chemistry and Chemical Technologies (2), TSTU; Tambov, Russia*

**Keywords:** adsorption; Freundlich equation; graphene materials; heavy metal ions; isotherms; Langmuir equation; Smith classification.

**Abstract:** The present paper describes a study on the adsorption of lead (II) ions on graphene materials. An equilibrium studies implementing the Freundlich and Langmuir isotherm models were performed. The applicability of the two isotherms for sorption processes shows that both monolayer adsorption and heterogeneous energetic distribution of active sites on the adsorbent surface may take place. The maximum experimental lead (II) adsorption capacities of the materials under study – multi-layered graphene paste, and few-layered graphene paste – were found to be 230 and 170 mg/g, respectively. Due to the high sorption characteristics and unique physical and chemical properties of these materials, the adsorption technologies developed herein can act as sustainable options for heavy metal removal from industrial effluents.

### References

1. Naseem R., Tahir S.S. Removal of Pb(II) from Aqueous Solution by Using Bentonite as an Adsorbent, *Water Research*, 2001, vol. 35, pp. 3982-3986.
2. Fu. F., Wang Q. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewaters: A review, *Journal of Environmental Management*, 2011, vol. 92, No. 3, pp. 407-418.

3. Sudhakar, Y., Dikshit, A.K. Removal of endosulfan using aerobic mixed bacterial culture, *International Journal of Environmental Pollution*, 2001, vol. 15, pp. 543-552.
4. Radovic L.R., Moreno-Castilla C., Rivera-Utrilla F. Carbon Materials as Adsorbents in Aqueous Solutions, *Chemistry and Physics of Carbon*, 2001, vol. 27, pp. 227-405.
5. Derbyshire F., Jagtoyen M., Andrews R., Rao A., Martin-Guillon I., Grulke E.A. Carbon Materials in Environmental Applications, *Chemistry and Physics of Carbon*, 2000, vol. 27, pp. 1-66.
6. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, *Science*, 2004, vol. 306, no. 5696, pp. 666-669.
7. Gomez-Navarro C., Burghard M., Kern K. Atomic structure of reduced graphene oxide, *Nano Letters*, 2008, vol. 8, pp. 2045-2049.
8. Park S., Lee K.S., Bozoklu G., Cai W., Nguyen S.B.T., Ruoff R.S. Graphene oxide papers modified by divalent ions-enhancing mechanical properties via chemical cross-linking, *ACS Nano*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 572-578.
9. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene, *Nano Letters*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 902-907.
10. Chandra, C., Kim, K.S. Highly selective adsorption of Hg<sup>2+</sup> by a polypyrrole-reduced graphene oxide composite, *Chemical Communication*, 2011, vol. 47, pp. 3942-3944.
11. Deng X., Lu L., Li H., Luo F. The Adsorption Properties of Pb (II) and Cd (II) on Functionalized Graphene Prepared by Electrolysis Method, *Journal Hazards Materials*, 2010, vol. 183, pp. 923-930.
12. Yang S.T., Chang Y., Wang H., Liu G., Chen S., Wang Y., Liu Y., Cao A. Folding/aggregation of graphene oxide and its application in Cu<sup>2+</sup> removal, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2010, vol. 351, issue 1, pp. 122-127.
13. Zhang N., Qiu H., Si Y., Wang W., Gao J. Fabrication of highly porous biodegradable monoliths strengthened by graphene oxide and their adsorption of metal ions, *Carbon*, 2011, vol. 49, issue 3, pp. 827-837.
14. Melezhyk A.V., Tkachev A.G. Synthesis of Graphene Nanoplatelets from Peroxosulfate Graphite Intercalation Compounds, *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 294-306.
15. Kucherova A.E., Romantsova I.V., Burakov A.E., Krasnyansky M.N., Memetov N.R. Graphene-Based Nano-composites for Enhanced Pb<sup>2+</sup> Adsorption, *Nano hybrids and composites*, 2016, vol. 13, pp. 323-329.
16. Kumar K.V., Sivanesan S. Pseudo second order kinetics and pseudo isotherms for malachite green onto activated carbon: comparison of linear and non-linear regression methods, *Journal of Hazards Materials B.*, 2006, vol. 136, pp. 721-726.
17. Parfitt G.D., Rochester C.H. *Adsorption from Solution at the Solid/Liquid Interface*, London: Academic press, 1983, 475 p.
18. Mukhin, V.M., Burakova I.V., Burakov A.E. Active Carbon as Nanoporous Material for Solving Environmental Problem, *Advanced Materials & Technologies*, 2017, no. 2, pp. 50-56, doi: 10.17277/amt.2017.02.pp.050-056
19. Tkachev A.G., Tarov D.V., Tarov V.P., Shubin I.N. [Technological Bases of Functionalization of Multiwalled Carbon Nanotubes by Titanium Stearate for Subsequent Production of Composites], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 501-509, doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.501-509 (In Russ., abstract in Eng.)

## **Isothermen der Adsorption von Ionen, Blei (II) durch Graphen-Nanoverbundwerkstoffe**

**Zusammenfassung:** Die vorliegende Arbeit ist der Untersuchung der Adsorption der Ionen von Blei (II) auf Graphen-Materialien gewidmet. Gleichgewichtsstudien wurden mit Hilfe der Freundlich- und Langmuir-Modelle durchgeführt. Die Anwendbarkeit aller zwei Isothermen zeugt davon, dass sowohl die Monoschichtadsorption als auch die heterogene Energieverteilung aktiver Zentren auf der Oberfläche des Adsorptionsmittels möglich sind. Die maximale experimentelle Adsorptionskapazität für Blei (II) für mehrschichtige Graphenpaste und Graphenpaste mit wenigen Schichten beträgt 230 bzw. 170 mg/g. Aufgrund der hohen Sorptionseigenschaften und einzigartigen physikalisch-chemischen Eigenschaften können die entwickelten Graphen-Nanoverbundwerkstoffe als vielversprechende Optionen bei der Entfernung von Schwermetallen aus Industrieabwässern dienen.

---

## **Les isothermes d'adsorption des ions de plomb (II) par des nanocomposites de graphene**

**Résumé:** Le présent article est consacré à l'étude de l'adsorption des ions de plomb (II) sur les matériaux de graphene. Les recherches de l'équilibre ont été réalisées à l'aide des modèles de Freundlich, de Langmuir. L'applicabilité de tous les deux isothermes dit que sont possibles l'adsorption de multiples couches ainsi que la répartition énergétique hétérogène des centres actifs sur la surface de l'adsorbant. La capacité maximale expérimentale d'adsorption par rapport au plomb (II) pour les pâtes de graphene de multiples couches et ceux de petites couches est égale à 230 et 170 mg/g, respectivement. Grâce aux hautes caractéristiques d'adsorption et des propriétés physico-chimiques uniques conçues les composites de graphene peuvent servir de variants dans l'élimination des métaux lourds à partir des effluents industriels.

---

**Авторы:** *Кучерова Анастасия Евгеньевна* – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Буракова Ирина Владимировна* – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Бураков Александр Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Брянкин Константин Вячеславович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химия и химическая технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Першин Владимир Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

## ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИСТЫХ СВЯЗОК СИСТЕМЫ «МЕДЬ – ЖЕЛЕЗО – ОЛОВО» И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ПОРИСТОСТЬ

И. С. Филатов, А. И. Буренина, А. С. Черкасова

*Кафедра «Материалы и технология»,  
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия;  
ridder@mail.ru*

**Ключевые слова:** абразивный материал; жидкофазное спекание; микроскопический анализ; прессование; пористость; пористые связки; система «медь – железо – олово»; химический состав.

**Аннотация:** Рассмотрены особенности технологического процесса получения металлических связок системы «медь – железо – олово» методом порошковой металлургии. Проведен анализ влияния состава шихты на структуру получаемых при жидкофазном спекании связок. Определены процентные соотношения и размеры пор в зависимости от состава связок.

---

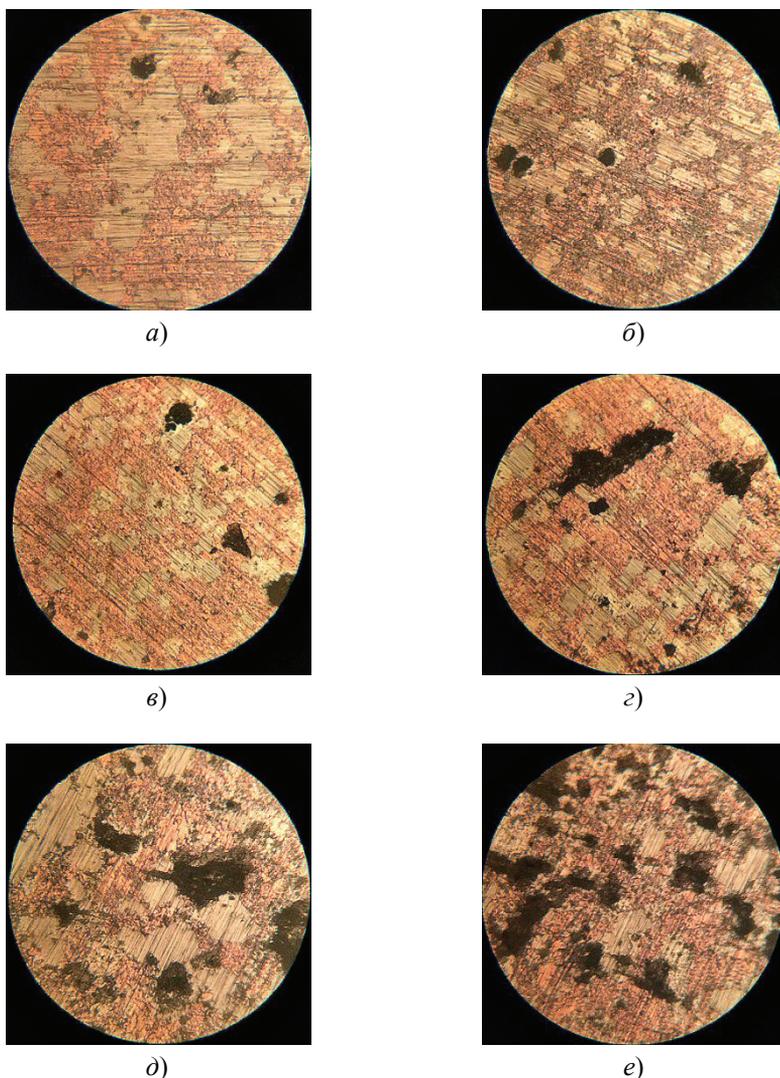
Связка обрабатывающего инструмента – важнейший компонент рабочего слоя, удерживающий в инструменте абразивные зерна. Вид связки в значительной мере предопределяет его работоспособность. При изготовлении связки методом порошковой металлургии необходимо учитывать также особенности получения и смешивания порошкообразных материалов связок [1].

Круги на металлической связке применяются только для инструмента, в котором абразивом служит алмаз (природный или синтетический), в следующих случаях: если необходимо обеспечить малый удельный расход алмаза, сохранить форму профиля инструмента, снять большой припуск. Необходимо учитывать гранулометрический состав смешиваемых порошков и их соотношение при получении необходимых свойств абразивного инструмента [2]. На таких связках изготавливают рабочие элементы алмазных штрипсовых пил, отрезных и шлифовальных кругов, фрез. Металлическая связка прочно удерживает алмазные зерна, поэтому обеспечивает меньший расход алмазов [3], однако силы и температура резания увеличиваются. Наблюдается склонность к засаливанию и адгезии, что ухудшает чистоту обработанной поверхности.

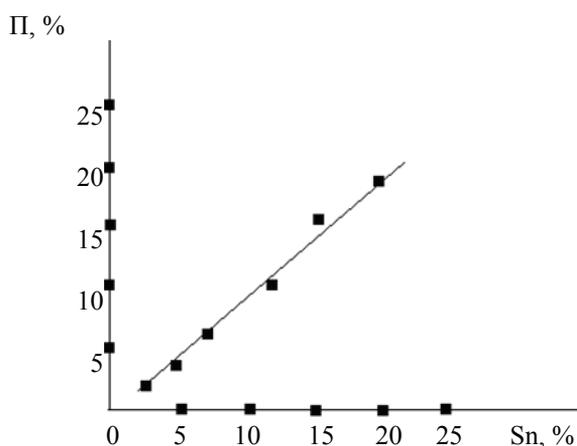
Пористые связки имеют объемную пористость, необходимую для проникновения охлаждающей жидкости в зону резания и удаления продуктов обработки. Данные связки обладают также высоким уровнем алмазоудержания, что предохраняет алмазные зерна от вдавливания в них и преждевременного выпадения. Стойкость брусков на пористых связках по сравнению с брусками на металлических связках выше в 34 раза [4]. Удельная производительность хонингования при обработке серых и закаленных чугунов крупнозернистыми брусками повышается более чем в 2,5 раза. Процесс резания крупнозернистыми брусками имеет незатухающий характер и позволяет спускать припуск на хонингование до 1 мм [4].

В ходе проведения работы выполнен подбор наилучшего состава металлической связки. Для получения прессовок использовались связки состава медь – олово – железо, с варьируемым содержанием олова: 3; 5; 7; 12; 15; 20 %. Железо во всех составах бралось 25 %, остальное – медь. Исследованием установлено, что изменение содержания олова ведет к изменению содержания пор в данной связке. Исследовались образцы кольцевидной формы после их прессовки с усилием  $80 \text{ кгс/мм}^2$  и последующим спеканием при температуре  $320 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 4 ч. Изучение микроструктуры проводилось после шлифовки и полировки образцов с их последующим травлением 5%-м раствором хлористого железа.

Для рассмотрения и фотографирования микроструктуры использовался металлографический микроскоп Neophot 21 (Carl Zeiss Jena, Германия) с общим увеличением оптической системы  $\times 500$ . На рисунке 1 показаны фотографии микроструктуры связок при различном содержании в них олова.



**Рис. 1. Микроструктура металлических связок «медь – олово – железо» при различном содержании олова, %:**  
*a – 3; б – 5; в – 7; г – 12; д – 15; е – 20*



**Рис. 2. График зависимости процентного содержания олова и пористости связки**

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что наиболее крупные поры образуются в процессе спекания в зернах олова (при спекании олово переходит в жидкую фазу и образует с медью твердый раствор внедрения). При образовании в приповерхностных слоях зерен меди сплава меди с оловом (оловянистой бронзы) происходит жесткое сцепление зерен связки между собой что повышает прочность изделия в целом. Значительное количество олова переходит в твердый раствор в зернах меди, что и приводит к образованию в зернах олова пор. Представим зависимость пористости связок от содержания олова в них, %: 2 – 3; 4 – 5; 6 – 7; 10 – 12; 16 – 15; 18 – 20 (рис. 2.).

Полученные результаты свидетельствуют о явной зависимости пористости связки в целом от процентного содержания олова в ней, что позволяет сделать вывод о возможности контролируемого задания необходимой пористости порошковых материалов изменением фазы, участвующей в жидкофазном спекании и образующей с основной фазой твердые растворы внедрения при температурах спекания. Построение графика позволяет судить о приближенности к линейной зависимости процентного содержания пор от содержания олова в сплаве связки.

Аппроксимация полиномом первой степени позволяет оценить пористость в связках системы «медь – железо – олово» в зависимости от процентного содержания олова в них (при обязательном жидкофазном спекании), %:

$$П = 0,85 Sn, \quad (1)$$

где П – пористость; Sn – процентное содержание олова в связке.

Для выявления влияния режимов спекания и режимов прессования на структуру и свойства порошковых металлических связок абразивных материалов проводят дополнительные исследования, целью которых является разработка оптимального технологического процесса изготовления изделий данного вида.

#### *Список литературы*

1. Севостьянов, М. В. Теоретические и экспериментальные исследования процесса компактирования техногенных порошкообразных материалов / М. В. Севостьянов, Т. Н. Ильина, Е. Н. Семерикова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т 22, № 4. – С. 420 – 426.

2. Капранова, А. Б. Учет гранулометрического состава сред при описании их смешивания в аппарате с подвижной лентой / А. Б. Капранова, М. Н. Бакин, А. И. Зайцев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2014. – Т 20, № 4. – С. 754 – 757.

3. Рыбаков, В. А. Абразивные материалы и инструменты / В. А. Рыбаков, В. И. Муцяно // под ред. В. А. Рыбакова. – М. : Изд-во НИИмаш, 1981. – 360 с.

4. Эфрос, М. Г. Современные абразивные инструменты / М. Г. Эфрос, В. С. Миронюк. – Л. : Машиностроение, 1987. – 158 с.

---

## Obtaining Porous Bindings of the “Copper – Iron – Tin” System and Research into the Influence of Chemical Composition on Porosity

I. S. Filatov, A. I. Burenina, A. C. Cherkasova

*Department of Materials and Technology,  
TSTU, Tambov, Russia; ridder@mail.ru*

**Keywords:** abrasive material; chemical composition; “copper – iron – tin” system; liquid-phase sintering; microscopic analysis; porosity; porous bonds; pressing.

**Abstract:** The features of the technological process for obtaining metal bonds of the “bronze – iron – tin” system by the powder metallurgy method are considered. The influence of the composition of the charge on the structure of the ligaments obtained during liquid-phase sintering is analyzed. Pore percentages and pore sizes are determined depending on the composition of the ligaments.

### *References*

1. Sevostyanov M.V., Ilyina T.N., Semerikova E.N. [Theoretical and experimental studies of the process of technogenic compaction of powdered materials], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 420-426. (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kapranova A.B., Bakin M.N., Zaitsev A.I. [The account of granulometric composition environments when describing their mixing in the apparatus with a movable tape], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 754-757. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Rybakov V.A., Mazanko V.I. *Abrazivnye materialy i instrumenty* [Abrasive materials and tools], Moscow: Izdatel'stvo NIImash, 1981, 360 p. (In Russ.)

4. Efros M.G., Mironyuk V.S. *Sovremennye abrazivnye instrumenty* [Modern grinding tools], Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 158 p. (In Russ.)

---

## Erhalten der porösen Bindungen des Systems “Kupfer – Eisen – Zinn” und Untersuchung des Einflusses der chemischen Zusammensetzung auf Porosität

**Zusammenfassung:** Es sind die Besonderheiten des technologischen Prozesses der Herstellung von Metallbindungen des “Bronze – Eisen – Zinn” – Systems mit Hilfe der Pulvermetallurgie – Methode betrachtet. Der Einfluss der Zusammensetzung der

Ladung auf die Struktur der Bindemittel, die während des Flüssigphasensinterns erhalten werden, ist analysiert. Es sind die Prozentsätze und Porengrößen der Poren in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Bindemittel bestimmt.

---

### **Obtention des ligaments poreux du système “cuivre – fer – étain” et étude de l'influence de la composition chimique sur la porosité**

**Résumé:** Sont examinées les caractéristiques du procédé technologique de l'obtention des ligaments métalliques du système “bronze – fer – étain” par la méthode de la métallurgie des poudres. Est effectuée une analyse de l'influence de la composition de la charge sur la structure des ligaments reçus lors du frittage de phase liquide. Sont définis les pourcentages et les dimensions des pores en fonction de la composition des ligaments.

---

**Авторы:** *Филатов Иван Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», *Буренина Анна Игоревна* – студент, *Черкасова Анастасия Сергеевна* – студент, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

**Рецензент:** *Поликарпов Валерий Михайлович* – доктор химических наук, профессор кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---

### **Итоги первого расширенного заседания Технического комитета по стандартизации ТК 393 «Услуги (работы) в сфере ЖКХ и формирование комфортной городской среды»**

Вопросы стандартизации услуг ЖКХ и формирования комфортной городской среды обсуждались 18 октября 2017 года. На первом расширенном заседании Технического комитета по стандартизации ТК 393 «Услуги (работы) в сфере жилищно-коммунального хозяйства и формирование комфортной городской среды» в Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Среди приглашенных был представитель Тамбовского государственного технического университета доктор экономических наук, доктор технических наук, профессор Константин Николаевич Савин.

Приказом Росстандарта России был обновлен состав комитета, в него вошли представители Минстроя России, Фонда реформирования ЖКХ, профессиональных объединений и учебных заведений (НИУ «Высшая школа экономики», РАН-ХиГС при Президенте РФ, НИУ МЭИ), и в том числе ТГТУ. Включение университета в состав столь представительного органа – это безусловно высокая оценка, данная в области деятельности по техническому регулированию и стандартизации качества жилищно-коммунальных услуг. Только четыре вуза страны получили возможность стать участниками реализации плана национальной стандартизации.

В сентябре месяце наш университет получил лицензию на осуществление профессиональной деятельности по подготовке специалистов по направлению «Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура». Для университета появилась возможность для системной грандиозной работы по стандартизации в управлении качеством жилищно-коммунальных услуг и самореализации в этом востребованном, высокопрофессиональном образовательном процессе.

Деятельность ТК 393 будет разделяться по направлениям, закрепленным в подкомитетах, «Управление многоквартирными домами», «Организация и управление капитальным ремонтом многоквартирных домов», «Организация и эксплуатация систем коммунального теплоснабжения», «Организация и эксплуатация систем коммунального водоснабжения и водоотведения», «Формирование комфортной городской среды и благоустройство городских территорий», «Обращение с твердыми коммунальными отходами», «Учет и сбережение коммунального ресурса» и «Автоматизация услуг ЖКХ».

Всего в ТК 393 будет работать восемь подкомитетов: «Управление МКД», «Организация и управление капитальным ремонтом МКД», «Организация и эксплуатация систем коммунального теплоснабжения», «Организация и эксплуатация систем коммунального водоснабжения и водоотведения», «Формирование комфортной городской среды и благоустройство городских территорий», «Обращение с твердыми коммунальными отходами», «Учет коммунального ресурса и его сбережение», «Автоматизация жилищно-коммунальных услуг и информационные системы в сфере ЖКХ».

Таким образом, за ТК 393 закреплена стандартизация не только технологических, но управленческих и организационных процессов в ЖКХ и городской среде,

что возможность использовать новые национальные стандарты в образовательном процессе и готовить специалистов, востребованных экономикой и обществом региона в новых экономических условиях.

Планирование работы ТК будет осуществлено по результатам инвентаризации существующих стандартов и потребностей сферы ЖКХ. Значительная часть стандартов требует отмены или актуализации. В том числе в актуализации нуждаются и 13 ГОСТов в сфере ЖКХ, утвержденных в 2014 – 2015 гг. и введенных в действие с 1 июля 2015 года, разработчиком которых был Тамбовский государственный технический университет в предыдущем составе комитета. Сегодняшняя актуальность деятельности ТК 393 определена тем, что обеспечение качества жилищно-коммунальных услуг приобрело статус национального проекта, а одним из механизмов управления качеством и его обеспечения признан на законодательном уровне механизм стандартизации.

Хочу выразить благодарность всем, кто участвовал в работе по признанию нашей деятельности в области ЖКХ на российском уровне. Наш университет является не только одним из разработчиков федерального государственного образовательного стандарта «Услуги в области ЖКХ и коммунальной инфраструктуры», он также входит в состав межведомственной рабочей группы по кадровому обеспечению при Минстрое РФ, активно участвует в реализации молодежных федеральных программ по энергосбережению, просветительской работы среди школьников.

*Руководитель направления  
«Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура»,  
доктор экономических наук, доктор технических наук, профессор,  
Почетный работник ЖКХ России  
К. Н. Савин*

**Богданов Олег Валерьевич**

Специалист по техническим вопросам ООО «ЮРТЕХЛОГ», г. Москва.

4 июля 2017 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 защитил диссертацию на тему «Герметичность химического оборудования с сальниковыми уплотнениями с терморасширенным графитом для газовых сред» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (химическая промышленность).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Г. В. Божко.

Работа выполнена на кафедре «Техника и технология полимерных материалов» ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет».

*Область научных интересов:* обеспечение герметичности оборудования химических производств.

---

**Воронцова Светлана Борисовна**

Старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

4 июля 2017 года на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 защитила диссертацию на тему «Моделирование и расчет двухтрубного теплообменника с учетом структуры потоков» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор А. Б. Голованчиков.

Работа выполнена на кафедре «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

*Область научных интересов:* теплообменные процессы и оборудование.

---

## Указатели к тому 23, 2017

### СОДЕРЖАНИЕ ТОМА 23, 2017

(по рубрикам;  
в алфавитном порядке авторов)

#### Автоматика. Информатика. Управление. Приборы

- Арзамасцев А. А., Залевский Д. В.** Численное исследование математических моделей распределенных многомерных объектов на основе неявных разностных схем ..... 232 – 240
- Артемова С. В., Артемов А. А., Диумесси М. Ф.** Топологии интеллектуальных нейронных сетей и их применение в задаче оперативной оценки параметров процессов, протекающих в теплотехнологическом объекте (на французском языке) ..... 383 – 389
- Беккер В. Ф.** Оптимальное стохастическое управление магнийтермическим восстановлением титана с естественным теплосъемом ..... 374 – 382
- Булатов В. Н., Худорожков О. В.** Спектральное преобразование сигналов с неравномерной дискретизацией ..... 033 – 047
- Герасимова Е. Б., Герасимов Б. И., Гудошников В. В., Стреха А. А., Сизикин А. Ю.** Идентификация структуры документов по стандартизации: документы по стандартизации на множестве состояний функционирования ..... 617 – 625
- Герасимова Е. Б., Герасимов Б. И., Тётушкин В. А., Стреха А. А., Сизикин А. Ю.** Открытость процедур проектирования документов по стандартизации ..... 402 – 411
- Джамбеков А. М., Щербатов И. А.** Оптимальное управление процессом каталитического риформинга бензиновых фракций ..... 557 – 571
- Дивин А. Г., Балабанов П. В., Шишкина Г. В., Мозгова Г. В.** Макет роботизированного комплекса для сортировки сельскохозяйственной продукции ..... 601 – 608
- Егоров С. Я., Немтинов К. В.** Информационное обеспечение системы управления принятием проектно-технологических решений ..... 225 – 231
- Жуков Н. П., Майникова Н. Ф., Rogov И. В.** Метод неразрушающего определения толщины защитных покрытий... 006 – 011
- Зацепина В. И., Зацепин Е. П., Шачнев О. Я.** Моделирование провалов напряжения в системах электроснабжения металлургических производств 247 – 251

### CONTENTS OF VOLUME 23, 2017

(by the main topics;  
in the authors alphabet)

#### Automation. Information Technology. Control. Instruments

- Arzamastsev A. A., Zalevskiy D. V.** Numerical Research into Mathematical Distribution Models of Multidimensional Objects Based on Implicit Difference Schemes
- Artemova S. V., Artemov A. A., Dioumessy M. F.** Topologies of Intellectual Neural Networks and Their Application in the Problem of Operational Evaluation of Process Parameters in Heat-Processing Facility (in French)
- Bekker V. F.** Optimal Stochastic Control of Magnesium Reduction of Titanium with Inartificial Heat Removal
- Bulatov V. N., Khudorozhkov O. V.** Spectral Transformation of Signals with Uneven Sampling
- Gerasimova E. B., Gerasimov B. I., Gudoshnikov V. V., Strekha A. A., Sizikin A. Y.** Identification of the Structure of Standardization Documents: Standardization Documents on the Set of States of Functioning
- Gerasimova E. B., Gerasimov B. I., Tyotushkin V. A., Strekha A. A., Sizikin A. Yu.** Openness and Transparency of the Design Documents on Standardization
- Dzhambekov A. M., Shcherbatov I. A.** Optimal Control of the Process of Catalytic Reforming of Petrol Fractions
- Divin A. G., Balabanov P. V., Shishkina G. V., Mozgova G. V.** A Model of Robotic Sorting Facility for Agricultural Products
- Egorov S. Ya., Nemtinov K. V.** Information Support of Decision-Making Control System for Design and Technological Solutions
- Zhukov N. P., Mainikova N. F., Rogov I. V.** Nondestructive Testing to Measure the Thickness of Coatings
- Zatsepina V. I., Zatsepin E. P., Shachnev O. Ya.** Simulation of Voltage Dips in the System Supply of Metallurgical Production

- Иванов В. М., Лановая А. В., Кобелев А. В., Кагдин А. Н.** Критерии надежности электромагнитного разрушения шинопроводов ..... 072 – 076
- Калинин В. Ф., Зяблов Н. М., Кочергин С. В., Кобелев А. В., Джапарова Д. А.** Анализ методов представления данных искусственной нейронной сети для управления электроэнергетическими системами ..... 609 – 616
- Коробова И. Л., Майстренко Н. В., Бараева Д. Д.** Разработка шаблона последовательности функций и связей для документов научно-образовательного учреждения ..... 241 – 246
- Краснянский М. Н., Попов А. И., Обухов А. Д.** Математическое моделирование адаптивной системы управления профессиональным образованием ..... 196 – 208
- Кудряшов В. С., Тихомиров С. Г., Рязанцев С. В., Иванов А. В., Коженко И. А.** Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака ..... 572 – 580
- Матвейкин В. Г., Ишин А. А., Скворцов С. А., Дворецкий С. И.** Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовых смесей и получения водорода ..... 548 – 556
- Мокрозуб В. Г., Малыгин Е. Н., Карпушкин С. В.** Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования .. 364 – 373
- Мокрозуб В. Г., Малыгин Е. Н., Карпушкин С. В.** Постановка задачи разработки математического и информационного обеспечения процесса проектирования многоассортиментных химических производств ..... 252 – 264
- Павлов В. И., Коломейцев В. Н., Калашников С. Н.** Дистанционное измерение параметров подвижных объектов полупассивным способом ..... 216 – 224
- Панасюк Ю. Н., Пудовкин А. П., Рогачёв А. И.** Метод повышения точности третичной обработки информации с применением динамических весовых коэффициентов ..... 595 – 600
- Поляков Д. В., Попов А. И., Дузькрятчченко С. А., Лепёшкин Е. Н.** К вопросу построения оптимальных по времени информационно-поисковых графов ..... 048 – 060
- Пономарев С. В., Мищенко С. В.** Выполнение процесса проектирования и разработки по требованиям ГОСТ Р ИСО 9001–2015 при модернизации и реинжиниринге технических систем ..... 077 – 084
- Ivanov V. M., Lanovaya A. V., Kobelev A. V., Kagdin A. N.** Reliability Criteria for Busbars against Electromagnetic Destruction
- Kalinin V. F., Zyablov N. M., Kochergin S. V., Kobelev A. V., Dzhaparova D. A.** The Analysis of Methods of Data Presentation of Artificial Neuron Networks for Electric Power Systems Control
- Korobova I. L., Maistrenko N. V., Baraeva D. D.** Development of the Template Sequence of Functions and Relations to Documents in Research and Academic Institutions
- Krasnyansky M. N., Popov A. I., Obukhov A. D.** Mathematical Modeling of the Adaptive Control System for Professional Education
- Kudryashov V. S., Tikhomirov S. G., Ryazanzev S. V., Ivanov A. V., Kozenko I. A.** A Method of Simulation of a Multilift Digital System of Controlling the Process of Ammonia Synthesis
- Matveykin V. G., Ishin A. A., Skvortsov S. A., Dvoretzky S. I.** Automating of the Process of Gas Mixtures Adsorptive Separation and Hydrogen Production
- Mokrozub V. G., Malygin E. N., Karpushkin S. V.** System Analysis of Decision-Making Processes in the Development of Process Equipment
- Mokrozub V. G., Malygin E. N., Karpushkin S. V.** Statement of the Problem of Mathematical and Information Support for the Design of Multi-Product Chemical Plants
- Pavlov V. I., Kolomeytsev V. N., Kalashnikov S. N.** Remote Measurement of Moving Objects using the Semi-Passive Method
- Panasyuk Yu. N., Pudovkin A. P., Rogachev A. I.** A Method of Increasing the Accuracy of Tertiary Information Processing Using Dynamic Weighting Coefficients
- Polyakov D. V., Popov A. I., Duzkryatchenko S. A., Lepyoshkin E. N.** On Construction of Optimal in Time Information Retrieval Count
- Ponomarev S. V., Mishchenko S. V.** Execution of “Design and Development” Process in Compliance with the Requirements of GOST R ISO 9001:2015 when Modernizing and Reengineering Technical Systems

<b>Селиванова З. М., Хоан Т. А.</b> Метод повышения точности информационно-измерительной системы параметров теплофизических свойств теплоизоляционных материалов .....	012 – 024
<b>Синдеев С. В., Фролов С. В., Потлов А. Ю.</b> Система поддержки принятия решений врача при оценке предоперационного состояния больных с острыми нарушениями мозгового кровообращения .....	581 – 588
<b>Синдеев С. В., Фролов С. В., Липш Д., Балассо А.</b> Моделирование изменений кровотока, вызванных установкой потоконаправляющего стента, с использованием многомасштабной модели гемодинамики ( <i>на английском языке</i> ) ...	025 – 032
<b>Форгани М. А., Кожевин А. В.</b> Статистическое сравнение вейвлет-преобразований в обработке сигналов нормальных электрокардиограмм .....	061 – 071
<b>Чернышова Т. И., Курносов Р. Ю.</b> Применение методов математического моделирования при оценке метрологической надежности блока аналого-цифрового преобразователя .....	589 – 594
<b>Чернышова Т. И., Каменская М. А., Курносов Р. Ю.</b> Математическое моделирование метрологических характеристик при оценке метрологической надежности электронных измерительных средств .....	209 – 215
<b>Шелохвостов В. П., Чернышов В. Н.</b> Методы и микропроцессорная система обнаружения и идентификации наноконструкций в наномодифицированных материалах и средах .....	390 – 401

#### **Процессы и аппараты химически и других производств. Химия**

<b>Абоносимов О. А., Кузнецов М. А., Ковалева О. А., Поликарпов В. М., Дмитриев В. М.</b> Кинетические зависимости и технологическая эффективность электрохимического мембранного разделения сточных вод на предприятиях .....	641 – 655
<b>Авцинов И. А., Кожевников Ю. Е., Суханова Н. В.</b> Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов .....	481 – 487
<b>Акулинин Е. И., Гладышев Н. Ф., Дворецкий С. И.</b> Перспективные технологии и методы создания композиционных сорбционно-активных материалов для циклических адсорбционных процессов .....	085 – 103

<b>Selivanova Z. M., Hoang T. A.</b> Method for Increasing the Accuracy of Information-Measuring System of Parameters of Thermophysical Properties of Thermal Insulation Materials	
<b>Sindeev S. V., Potlov A. Yu., Frolov S. V.</b> Decision-Making Support System for Doctors to Assess the Preoperative State of Patients with Acute Brain Circulation Disorders	
<b>Sindeev S. V., Frolov S. V., Lipsch D., Balasso A.</b> Modeling of Flow Alterations Induced by Flow-Diverter Using Multiscale Model of Hemodynamics ( <i>in English</i> )	
<b>Forgani M. A., Kozhevin A. V.</b> Statistical Comparison of Wavelet Transforms in Signal Processing of Normal Electrocardiograms	
<b>Chernyshova T. I., Kurnosov R. Yu.</b> Application of Mathematical Modeling Methods in the Assessment of Metrological Reliability of Analog-to-Digital Converter Unit	
<b>Chernyshova T. I., Kamenskaya M. A., Kurnosov R. Yu.</b> Mathematical Modeling of the Metrological Characteristics in Assessment of Electronic Metrological Reliability of Electronic Measuring Equipment	
<b>Shelokhovostov V. P., Chernyshov V. N.</b> Methods and Microprocessor System of Detection and Identification of Nanocomponents in Nanomodified Materials and Media	

#### **Chemical and Related Engineering. Chemistry**

<b>Abonosimov O. A., Kuznetsov M. A., Kovaleva O. A., Polikarpov V. M., Dmitriev V. M.</b> Kinetic Dependencies and Technological Effectiveness of Electrochemical Membrane Separation of Sewage Waters at Enterprises	
<b>Avtsinov I. A., Kozhevnikov Yu. E., Sukhanova N. V.</b> Model of Kinetics of the Microorganisms Cultivation Process	
<b>Akulinin E. I., Gladyshev N. F., Dvoretzky S. I.</b> Advanced Technologies and Methods of Creating Composite Sorption-Active Materials for Cyclic Adsorption Processes	

- Акулинчев А. М., Абоносимов О. А., Лазарев С. И.** Исследование электробаромембранного разделения промышленных технологических растворов, содержащих ионы тяжелых металлов Pb, Cd, Fe ..... 120 – 128
- Брянкин К. В., Орехов В. С., Дегтярев А. А., Бельков А. И.** Квантово-химическое моделирование молекулярной структуры пигментов с ионами водных примесей и воды ..... 471 – 480
- Иванов О. О., Парфенова Е. А., Долгунин В. Н.** Технология подготовки зернового сырья для биоконверсии с повышенной экстрактивностью ..... 656 – 664
- Капранова А. Б., Верлока И. И., Бакин М. Н., Таршис М. Ю.** Методика определения рациональных диапазонов изменения параметров барабанно-ленточного смесителя сыпучих материалов ..... 428 – 439
- Капранова А. Б., Верлока И. И., Бакин М. Н., Яковлев П. А.** Методика расчета ленточного конвейера для смесительного аппарата с подвижной лентой ..... 626 – 634
- Леонтьева А. И., Балабаева Н. Н., Брянкин К. В., Аль Фадхли Кхазал Хамид Кхазал, Аль Рубай Раафат Абдурахман Ахмет.** Формирование структуры водонефтяных эмульсий .... 635 – 640
- Мележик А. В., Алехина О. В., Герасимова А. В., Ткачев А. Г.** Исследование поликонденсации гексаметилентетрамина и свойств образующихся продуктов ..... 461 – 470
- Образцова Е. Ю., Килимник А. Б.**
- Рухов А. В.** Исследование закономерностей формирования и физико-химических свойств порошков оксида никеля, синтезированных методом электрохимического диспергирования никеля ..... 104 – 110
- Орлова Н. В., Гатапова Н. Ц., Ященко А. Г., Шевцова О. В., Мыльникова Е. В.** Расчет процесса кристаллизации, осложненного химической реакцией ..... 295 – 299
- Орлова Н. В., Ященко А. Г., Гатапова Н. Ц., Шевцова О. В., Мыльникова Е. В.** Влияние неорганических примесей на процесс кристаллизации сульфаминовой кислоты ..... 274 – 279
- Попов Р. В., Лазарев С. И., Ковалев С. В., Арзамасцев А. А., Дмитриев В. М.** Электронанофильтрационная очистка сточных вод машиностроительных производств от некоторых ионов ..... 288 – 294
- Промтов М. А.** Изменение фракционного состава нефти при гидроимпульсной кавитационной обработке .... 412 – 419
- Akulinchev A. M., Abonosimov O. A., Lazarev S. I.** Research into Electric Baromembrane Separation of Industrial Process Solutions Containing Ions of Heavy Metals Pb, Cd, Fe
- Bryankin K. V., Orekhov V. S., Degtyarev A. A., Belkov A. I.** Quantum-Chemical Modeling of the Molecular Structure of Pigments with Ions of Water Impurities and Water
- Ivanov O. O., Parfenova E. A., Dolgunin V. N.** The Technology of Preparing Raw Grain for Bioconversion with High Extract Content
- Kapranova A. B., Verloka I. I., Bakin M. N., Tarshis M. Yu.** Method of Determination of Rational Variation Ranges of Parameters of Drum-Ribbon Mixer for Loose Materials
- Kapranova A. B., Verloka I. I., Bakin M. N., Yakovlev P. A.** A Method of Designing the Belt Conveyor for Mixer with Movable Belt
- Leontieva A. I., Balabayeva N. N., Bryankin K. V., Al Fadhli Khazal Khamid Khazaal, Al Rubai Raafat Abdurahman Ahmet.** Formation of Water-Oil Emulsions
- Melezhik A. V., Alekhina O. V., Gerasimova A. V., Tkachev A. G.** Investigation of Polycondensation of Hexamethylene-Meter and Minerals of Obtaining Products
- Obraztsova E. Yu., Kilimnik A. B.**
- Rukhov A. V.** The Study of Nickel Voltammograms in Alkaline Solutions to Improve the Technology of Electrochemical Production of Nickel Oxide Nanopowders
- Orlova N. V., Gatapova N. Ts., Yashchenko A. G., Shevtsova O. V., Mylnikova E. V.** Calculation of the Crystallization Process Complicated by Chemical Reaction
- Orlova N. V., Yashchenko A. G., Gatapova N. Ts., Shevtsova O. V., Mylnikova E. V.** The Effect of Inorganic Impurities on Crystallization of Sulfamic Acid
- Popov R. V., Lazarev S. I., Kovalev S. V., Arzamastsev A. A., Dmitriev V. M.** Electro-Nanofiltration Treatment of Industrial Waste Water from Some Ions
- Promptov M. A.** Change in Fractional Composition of Oil in Hydro-Pulse Cavitation Processing

<b>Промтов М. А., Степанов А. Ю., Аleshин А. В.</b> Кинетика экстрагирования гуминовых и фульвокислот в роторном импульсном аппарате .....	265 – 273
<b>Романова Е. В., Колиух А. Н., Лебедев Е. А.</b> Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора .....	420 – 427
<b>Савельев Е. А., Дикун М. П.</b> Эффективность очистки медьсодержащих растворов импульсным электролизом .....	672 – 679
<b>Святский В. М., Сентяков К. Б., Сентяков Б. А., Святский М. А.</b> Формообразование холстов из синтетических волокнистых материалов.....	300 – 306
<b>Севостьянов В. С., Уральский В. И., Бойчук И. П., Перельгин Д. Н., Ермилов Р. А.</b> Технологический комплекс и агрегаты для получения высокодисперсных и ультрадисперсных материалов.....	680 – 687
<b>Севостьянов М. В., Ильина Т. Н., Бойчук И. П., Перельгин Д. Н., Кошуков А. В., Емельянов Д. А.</b> Пневмомеханические аппараты для микрогранулирования техногенных материалов .....	452 – 460
<b>Селиванов Ю. Т., Родионов Ю. В., Рыжкин В. Ю., Поздникин А. О.</b> Исследование влияния осевого движения на процесс классификации сыпучих материалов во вращающемся барабане .....	280 – 287
<b>Скопинцев И. В., Божко Г. В., Носков С. А., Нечаев В. М.</b> Определение краевого угла смачивания оросителей градирни из полимерных композиционных материалов.....	665 – 671
<b>Соколов М. В.</b> Математическое моделирование процесса экструзии резиновых смесей с учетом подвулканизации и степени пластикации профилированного экструдата.....	440 – 451
<b>Сухорукова Т. А., Боршев В. Я., Михайлова Л. Г., Михайлова Е. Г., Осипов Н. Н.</b> Исследование процесса очистки сточных вод на ПАО «Пигмент» ...	129 – 134
<b>Хмелев В. Н., Шалунов А. В., Доровских Р. С., Нестеров В. А., Шалунова А. В.</b> Исследование режимов ультразвукового воздействия для распыления различных по свойствам жидкостей .....	111 – 119

#### Математика. Физика

<b>Барсуков В. И., Гребеников М. В., Дмитриев О. С., Емельянов А. А., Барсуков А. А.</b> Исследование некоторых влияющих факторов при определении щелочных элементов методом пламенной эмиссионной фотометрии ....	323 – 331
--	-----------

<b>Promptov M. A., Stepanov A. Yu., Aleshin A. V.</b> Extraction Kinetics of Humic and Fulvic Acids in the Rotor-Stator Device	
<b>Romanova E. V., Koliukh A. N., Lebedev E. A.</b> Application of the ANSYS Package in Research of Hydraulic Resistance of Finned Heat Exchanger	
<b>Savelieva E. A., Dikun M. P.</b> The Efficiency of Cleaning of Copper Solutions by Pulsed Electrolysis	
<b>Svyatsky V. M., Sentyakov K. B., Sentyakov B. A., Svyatsky M. A.</b> Shaping Canvases from Synthetic Fiber Materials	
<b>Sevostyanov V. S., Uralsky V. I., Boychuk I. P., Perelygin D. N., Ermilov R. A.</b> Technological System and Units for Manufacturing of Fine and Ultrafine Materials	
<b>Sevostyanov M. V., Pyina T. N., Boichuk I. P., Perelygin D. N., Koshchukov A. V., Emelyanov D. A.</b> Pneumatic Mechanical Equipment for Microgranulation of Manmade Materials	
<b>Selivanov Yu. T., Rodionov Yu. V., Ryzhkin V. Yu., Pozdnikin A. O.</b> Research into the Influence of the Axial Movement on the Classification Process of Bults in the Rotating Drum	
<b>Skopintsev I. V., Bozhko G. V., Noskov A. S., Nechaev V. M.</b> Determination of the Wetting Angle of Sprinklers for Cooling Towers Made of Composite Materials	
<b>Sokolov M. V.</b> Mathematical Modeling of the Rubber Mixtures Extrusion Process with Reference to the Degree of Pre-Curing and Plasticization of Corrugated Extrudate	
<b>Sukhorukova T. A., Borshchev V. Ya., Mikhailova L. G., Mikhailova E. G., Osipov N. N.</b> Research into Wastewater Treatment at JSC “Pigment”	
<b>Khmelev V. N., Shalunov A. V., Dorovskikh R. S., Nesterov V. A., Shalunova A. V.</b> Research into Ultrasonic Exposure Modes for Spraying Liquids with Different Properties	

#### Mathematics. Physics

<b>Barsukov V. I., Grebennikov M. V., Dmitriev O. S., Emelyanov A. A., Barsukov A. A.</b> Study of Some Influencing Factors in Determining Alkali Elements by Flame Emission Photometry	
---	--

- Иванов В. М., Лановая А. В., Кобе-  
лев А. В., Зарандия Ж. А., Федосо-  
ва Е. О.** Энергетические каналы дис-  
сипации электромагнитной энергии в  
дефектных проводниках. Часть 1 ..... 149 – 155
- Иванов В. М., Лановая А. В., Кобе-  
лев А. В., Зарандия Ж. А., Федосо-  
ва Е. О.** Энергетические каналы дис-  
сипации электромагнитной энергии в  
дефектных проводниках. Часть 2 ..... 332 – 337
- Ломакина О. В., Молотков Н. Я.,  
Ермаков А. В.** Сложение и интерфе-  
ренция двух когерентных электромаг-  
нитных волн с произвольной ориен-  
тацией линий поляризации ..... 312 – 322
- Нахман А. Д.** Двухсторонние оценки  
мажорант экспоненциальных средних  
рядов Фурье ..... 488 – 501
- Нахман А. Д., Осиленкер Б. П.** Регу-  
лярные полунепрерывные методы  
суммирования рядов Фурье (*на ан-  
глийском языке*) ..... 135 – 148
- Фомин В. И.** Об одном приложении  
операторного уравнения Риккати ..... 307 – 311

#### **Машиностроение. Металлообработка**

- Божко Г. В., Черемухин В. В., Ско-  
пинцев И. В.** Компенсация темпера-  
турных нагрузок во фланцевом разъ-  
емном соединении ..... 165 – 170
- Ванин В. А., Колодин А. Н., Роди-  
на А. А.** Синтез структуры формооб-  
разующих цепей на основе гидравли-  
ческих связей в станках со сложны-  
ми движениями формообразования.... 518 – 526
- Ванин В. А., Колодин А. Н., Роди-  
на А. А.** Формообразующие цепи  
металлорежущих станков на основе  
гидравлических связей ..... 688 – 697
- Малыгин Е. Н., Карпушкин С. В.,  
Корнилов К. С.** Методика техноло-  
гических расчетов систем нагрева  
прессового оборудования ..... 502 – 517
- Продан В. Д., Божко Г. В., Богда-  
нов О. В., Бойко П. Н.** Сальниковые  
уплотнения подвижных соединений ... 156 – 164
- Симанин Н. А., Коновалов В. В.,  
Родионов Ю. В.** Адаптивное управ-  
ление гидравлическим приводом ме-  
таллорежущего станка ..... 338 – 347

#### **Материаловедение. Нанотехнологии**

- Корендясев С. П., Фирсова А. В.,  
Мордасов Д. М., Мордасов М. М.**  
Моделирование и фрактальный анализ  
молекулярных пленочных структур..... 527 – 534
- Королев А. П., Лоскутова А. Д.** Ис-  
следование электрофизических свойств  
композита железо – карбид вольфрама .. 535 – 540

- Ivanov V. M., Lanovaya A. V.,  
Kobelev A. V., Zarandiya Zh. A.,  
Fedosova E. O.** Energy Channels of  
Electromagnetic Energy Dissipation in  
Flawed Conductors. Part 1
- Ivanov V. M., Lanovaya A. V.,  
Kobelev A. V., Zarandiya Zh. A.,  
Fedosova E. O.** Energy Channels of  
Electromagnetic Energy Dissipation in  
Flawed Conductors. Part 2
- Lomakina O. V., Molotkov N. Ya.,  
Ermakov A. V.** Addition and Interference  
of Two Coherent Electromagnetic  
Waves with Arbitrary Orientation  
Polarization Lines
- Nakhman A. D.** Bilateral Estimates of  
Majorants of Exponential Means  
of Fourier Series
- Nakhman A. D., Osilenker B. P.** Regular  
Semi-Continuous Methods of Summation  
of Fourier Series (*in English*)
- Fomin V. I.** An Application of the  
Riccati Operator Equation

#### **Mechanical Engineering. Metal Treatment**

- Bozhko G. V., Cheryomukhin V. V.,  
Skopintsev I. V.** Compensation of  
Thermal Loads in Detachable Flange  
Connections
- Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A.**  
Synthesis of the Structure of Formative  
Chains Based on Hydraulic Connections  
in Machines with Complex Shape-  
Generating Motions
- Vanin V. A., Kolodin A. N., Rodina A. A.**  
Forming Chains of Metal-Cutting Machines  
Based on Hydraulic Connections
- Malygin E. N., Karpushkin S. V.,  
Kornilov K. S.** Method of Technological  
Calculation for Heating Systems of  
Press Equipment
- Prodan V. D., Bozhko G. V., Bogda-  
nov O. V., Boyko P. N.** Shaft Seals for  
Movable Joints
- Simanin N. A., Konvalov V. V.,  
Rodionov Yu. V.** Adaptive Control of  
the Hydraulic Drive of the Metal Cutting  
Machine

#### **Material Science. Nanotechnology**

- Korendyasev S. P., Firsova A. V.,  
Mordasov D. M., Mordasov M. M.**  
Modeling and Fractal Analysis of  
Molecular Film Structures
- Korolev A. P., Loskutova A. D.**  
Investigation of Electrophysical Properties  
of the Iron-Carbide Tungsten Composite

<b>Кучерова А. Е., Буракова И. В., Бураков А. Е., Брянкин К. В.</b> Изотермы адсорбции ионов свинца (II) графеновыми нанокompозитами.....	698 – 706
<b>Мордасов Д. М., Мордасов М. М., Фирсова А. В., Мордасов М. Д.</b> О взаимодействии акустически модулированной газовой струи с однородной плоской поверхностью.....	180 – 187
<b>Мордасов М. Д., Фирсова А. В., Мордасов Д. М.</b> Влияние истинной плотности частиц порошковых систем на их фрактальную размерность.....	348 – 355
<b>Проценко И. Г., Мордасов Д. М., Кобзев Д. Е.</b> Изучение температурно-временных режимов спекания и их влияния на структуру металлокерамических постоянных магнитов.....	171 – 179
<b>Филатов И. С., Буренина А. И., Черкасова А. С.</b> Получение пористых связок системы «медь – железо – олово» и исследование влияния химического состава на пористость.....	707 – 711

### Информация

<b>Итоги</b> первого расширенного заседания Технического Комитета по стандартизации ТК 393 «Услуги (работы) в сфере ЖКХ и формирования комфортной городской среды» ( <i>К. Н. Савин</i> ).....	712 – 713
--	-----------

### Наши новые профессора, доктора и кандидаты наук

<b>Абоносимов Д. О.</b> .....	541
<b>Абоносимов О. А.</b> .....	356
<b>Акулинчев А. М.</b> .....	541
<b>Беляев В. П.</b> .....	188
<b>Бернацкий П. Н.</b> .....	357
<b>Богданов О. В.</b> .....	714
<b>Воронцова С. Б.</b> .....	714
<b>Грибков А. Н.</b> .....	357
<b>Жарикова М. В.</b> .....	188
<b>Као Ван Зыонг</b> .....	541
<b>Комраков Д. В.</b> .....	542
<b>Обухов А. Д.</b> .....	188
<b>Ованесян И. Г.</b> .....	189
<b>Третьяков В. В.</b> .....	542
<b>Удалов Е. В.</b> .....	189
<b>Хоан Туан Ань</b> .....	542

<b>Kucherova A. E., Burakova I. V., Burakov A. E., Bryankin K. V.</b> Graphene Composites for Lead (II) Extraction: an Equilibrium Study	
<b>Mordasov D. M., Mordasov M. M., Firsova A. V., Mordasov M. D.</b> Interaction of Acoustically Modulated Gas Jet with Homogeneous Plane Surface	
<b>Mordasov M. D., Firsova A. V., Mordasov D. M.</b> Effect of the True Particle Density of Powder Systems on Their Fractal Dimension	
<b>Protsenko I. G., Mordasov D. M., Kobzev D. E.</b> Study of Temperature-Time Modes of Sintering and Their Impact on the Structure of Metal-Ceramic Permanent Magnets	
<b>Filatov I. S., Burenina A. I., Cherkasova A. C.</b> Obtaining Porous Bindings of the “Copper – Iron – Tin” System and Research into the Influence of Chemical Composition on Porosity	

### Information

<b>Summing up</b> the Result of the Meeting of the Technical Committee on Standardization TC 393 “Communal Services and Creating Comfortable Urban Environment” ( <i>K. N. Savin</i> )	
--	--

### New Professors, Doctors and Candidates of Sciences

<b>Abonosimov D. O.</b>
<b>Abonosimov O. A</b>
<b>Akulinchev A. M.</b>
<b>Belyaev V. P.</b>
<b>Bernatskii P. N.</b>
<b>Bogdanov O. V.</b>
<b>Vorontsova S. B.</b>
<b>Gribkov A. N.</b>
<b>Zharikova M. V.</b>
<b>Kao Van Zyong</b>
<b>Komrakov D. V.</b>
<b>Obukhov A. D.</b>
<b>Ovanesyan I. G.</b>
<b>Tret'yakov V. V.</b>
<b>Udalov E. V.</b>
<b>Khoan Tuan An'</b>

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ АВТОРОВ

## AUTHOR INDEX

### А

- Абоносимов О. А. 120 – 128, 641 – 655  
Авцинов И. А. 481 – 487  
Акулинин Е. И. 085 – 103  
Акулинчев А. М. 120 – 128  
Алехина О. В. 461 – 470  
Алешин А. В. 265 – 273  
Аль Рубай Раафат  
Абдурахман Ахмет 635 – 640  
Аль Фадхли Кхазал  
Хамид Кхазал 635 – 640  
Арзамасцев А. А. 232 – 240, 288 – 294  
Артемов А. А. 383 – 389  
Артемова С. В. 383 – 389

### Б

- Бакин М. Н. 428 – 439, 626 – 634  
Балабаева Н. Н. 635 – 640  
Балабанов П. В. 557 – 571  
Балассо А. 025 – 032  
Бараева Д. Д. 241 – 246  
Барсуков А. А. 323 – 331  
Барсуков В. И. 323 – 331  
Беккер В. Ф. 374 – 382  
Бельков А. И. 471 – 480  
Богданов О. В. 156 – 164  
Божко Г. В. 165 – 170, 156 – 164, 665 – 671  
Бойко П. Н. 156 – 164  
Бойчук И. П. 452 – 460, 680 – 687  
Борщев В. Я. 129 – 134  
Брянкин К. В. 471 – 480, 635 – 640, 698 – 706  
Булатов В. Н. 033 – 047  
Бураков А. Е. 698 – 706  
Буракова И. В. 698 – 706  
Буренина А. И. 707 – 711

### В

- Ванин В. А. 518 – 526, 688 – 697  
Верлока И. И. 428 – 439, 626 – 634

### Г

- Гатапова Н. Ц. 274 – 279, 295 – 299  
Герасимов Б. И. 402 – 411, 617 – 625  
Герасимова Е. Б. 402 – 411, 617 – 625  
Герасимова А. В. 461 – 470  
Гладышев Н. Ф. 085 – 103  
Гребенников М. В. 323 – 331  
Гудошников В. В. 617 – 625

### Д

- Дворецкий С. И. 85 – 103, 548 – 556  
Дегтярев А. А. 471 – 480  
Джамбеков А. М. 557 – 571  
Джапарова Д. А. 609 – 616

### А

- Abonosimov O. A.  
Avtsinov I. A.  
Akulinin E. I.  
Akulinchev A. M.  
Alekhina O. V.  
Aleshin A. V.  
Al Rubai Raafat  
Abdurahman Ahmet  
Al Fadhli Khazal  
Khamid Khazaal  
Arzamastsev A. A.  
Artemov A. A.  
Artemova S. V.

### В

- Bakin M. N.  
Balabayeva N. N.  
Balabanov P. V.  
Balasso A.  
Baraeva D. D.  
Barsukov A. A.  
Barsukov V. I.  
Bekker V. F.  
Belkov A. I.  
Bogdanov O. V.  
Bozhko G. V.  
Boyko P. N.  
Boichuk I. P.  
Borshchev V. Ya.  
Bryankin K. V.  
Bulatov V. N.  
Burakov A. E.  
Burakova I. V.  
Burenina A. I.

### В

- Vanin V. A.  
Verloka I. I.

### Г

- Gatapova N. Ts.  
Gerasimov B. I.  
Gerasimova E. B.  
Gerasimova A. V.  
Gladyshev N. F.  
Grebennikov M. V.  
Gudoshnikov V. V.

### Д

- Dvoretzky S. I.  
Degtyarev A. A.  
Dzhambekov A. M.  
Dzhaparova D. A.

Дивин А. Г.	557 – 571	Divin A. G.
Дикун М. П.	672 – 679	Dikun M. P.
Диумесси М. Ф.	383 – 389	Dioumessy M. F.
Дмитриев В. М.	288 – 294, 641 – 655	Dmitriev V. M.
Дмитриев О. С.	323 – 331	Dmitriev O. S.
Долгунин В. Н.	656 – 664	Dolgunin V. N.
Доровских Р. С.	111 – 119	Dorovskikh R. S.
Дузъкрятчєнко С. А.	048 – 060	Duzkryatchenko S. A.
<b>Е</b>		
Егоров С. Я.	225 – 231	Egorov S. Ya.
Емельянов Д. А.	452 – 460	Emelyanov D. A.
Емельянов А. А.	323 – 331	Emelyanov A. A.
Ермаков А. В.	312 – 322	Ermakov A. V.
Ермилов Р. А.	680 – 687	Ermilov R. A.
<b>Ж</b>		
Жуков Н. П.	6 – 11	Zhukov N. P.
<b>З</b>		
Залевский Д. В.	232 – 240	Zalevskiy D. V.
Зарандия Ж. А.	149 – 155, 332 – 337	Zarandiya Zh. A.
Зацепин Е. П.	247 – 251	Zatsepin E. P.
Зацепина В. И.	247 – 251	Zatsepina V. I.
Зяблов Н. М.	609 – 616	Zyablov N. M.
<b>И</b>		
Иванов А. В.	572 – 580	Ivanov A. V.
Иванов В. М.	72 – 76, 149 – 155, 332 – 337	Ivanov V. M.
Иванов О. О.	656 – 664	Ivanov O. O.
Ильина Т. Н.	452 – 460	Ilyina T. N.
Ишин А. А.	548 – 556	Ishin A. A.
<b>К</b>		
Кагдин А. Н.	72 – 76	Kagdin A. N.
Калашников С. Н.	216 – 224	Kalashnikov S. N.
Калинин В. Ф.	609 – 616	Kalinin V. F.
Каменская М. А.	209 – 215	Kamenskaya M. A.
Капранова А. Б.	428 – 439, 626 – 634	Kapranova A. B.
Карпушкин С. В.	252 – 264, 364 – 373, 502 – 517	Karpushkin S. V.
<u>Килимник А. Б.</u>	104 – 110	<u>Kilimnik A. B.</u>
Кобелев А. В.	72 – 76, 149 – 155, 332 – 337, 609 – 616	Kobelev A. V.
Кобзев Д. Е.	171 – 179	Kobzev D. E.
Ковалев С. В.	288 – 294	Kovalev S. V.
Ковалева О. А.	641 – 655	Kovaleva O. A.
Кожевин А. В.	061 – 071	Kozhevin A. V.
Кожевников Ю. Е.	481 – 487	Kozhevnikov Yu. E.
Козенко И. А.	572 – 580	Kozenko I. A.
Колнух А. Н.	420 – 427	Koliukh A. N.
Колодин А. Н.	518 – 526, 688 – 697	Kolodin A. N.
Коломейцев В. Н.	216 – 224	Kolomeytshev V. N.
Коновалов В. В.	338 – 347	Konovalov V. V.
Корендясев С. П.	527 – 534	Korendyasev S. P.
Корнилов К. С.	502 – 517	Kornilov K. S.
Коробова И. Л.	241 – 246	Korobova I. L.
Королев А. П.	535 – 540	Korolev A. P.
Кочергин С. В.	609 – 616	Kochergin S. V.

<b>Коцуков А. В.</b>	452 – 460	<b>Koshchukov A. V.</b>
<b>Краснянский М. Н.</b>	196 – 208	<b>Krasnyansky M. N.</b>
<b>Кудряшов В. С.</b>	572 – 580	<b>Kudryashov V. S.</b>
<b>Кузнецов М. А.</b>	641 – 655	<b>Kuznetsov M. A.</b>
<b>Курносов Р. Ю.</b>	209 – 215, 589 – 594	<b>Kurnosov R. Yu.</b>
<b>Кучерова А. Е.</b>	698 – 706	<b>Kucherova A. E.</b>
<b>Л</b>		<b>L</b>
<b>Лазарев С. И.</b>	120 – 128, 288 – 294	<b>Lazarev S. I.</b>
<b>Лановая А. В.</b>	72 – 76, 149 – 155, 332 – 337	<b>Lanovaya A. V.</b>
<b>Лебедев Е. А.</b>	420 – 427	<b>Lebedev E. A.</b>
<b>Леонтьева А. И.</b>	635 – 640	<b>Leontieva A. I.</b>
<b>Лепёшкин Е. Н.</b>	48 – 60	<b>Lepyoshkin E. N.</b>
<b>Липш Д.</b>	25 – 32	<b>Liepsch D.</b>
<b>Ломакина О. В.</b>	312 – 322	<b>Lomakina O. V.</b>
<b>Лоскутова А. Д.</b>	535 – 540	<b>Loskutova A. D.</b>
<b>М</b>		<b>M</b>
<b>Майникова Н. Ф.</b>	6 – 11	<b>Mainikova N. F.</b>
<b>Майстренко Н. В.</b>	241 – 246	<b>Maistrenko N. V.</b>
<b>Малыгин Е. Н.</b>	364 – 373, 502 – 517, 252 – 264	<b>Malygin E. N.</b>
<b>Матвейкин В. Г.</b>	548 – 556	<b>Matveykin V. G.</b>
<b>Мележик А. В.</b>	461 – 470	<b>Melezhhik A. V.</b>
<b>Михайлова Е. Г.</b>	129 – 134	<b>Mikhailova E. G.</b>
<b>Михайлова Л. Г.</b>	129 – 134	<b>Mikhailova L. G.</b>
<b>Мищенко С. В.</b>	77 – 084	<b>Mishchenko S. V.</b>
<b>Мозгова Г. В.</b>	557 – 571	<b>Mozgova G. V.</b>
<b>Мокрозуб В. Г.</b>	252 – 264, 364 – 373	<b>Mokrozub V. G.</b>
<b>Молотков Н. Я.</b>	312 – 322	<b>Molotkov N. Ya.</b>
<b>Мордасов Д. М.</b>	527 – 534	<b>Mordasov D. M.</b>
<b>Мордасов Д. М.</b>	171 – 179, 180 – 187, 348 – 355	<b>Mordasov D. M.</b>
<b>Мордасов М. М.</b>	180 – 187, 527 – 534	<b>Mordasov M. M.</b>
<b>Мордасов М. Д.</b>	180 – 187, 348 – 355	<b>Mordasov M. D.</b>
<b>Мыльникова Е. В.</b>	274 – 279, 295 – 299	<b>Mylnikova E. V.</b>
<b>Н</b>		<b>N</b>
<b>Нахман А. Д.</b>	488 – 501	<b>Nakhman A. D.</b>
<b>Нахман А. Д.</b>	135 – 148	<b>Nakhman A. D.</b>
<b>Немтинов К. В.</b>	225 – 231	<b>Nemtinov K. V.</b>
<b>Нестеров В. А.</b>	111 – 119	<b>Nesterov V. A.</b>
<b>Нечаев В. М.</b>	665 – 671	<b>Nechaev V. M.</b>
<b>Носков С. А.</b>	665 – 671	<b>Noskov A. S.</b>
<b>О</b>		<b>O</b>
<b>Образцова Е. Ю.</b>	104 – 110	<b>Obraztsova E. Yu.</b>
<b>Обухов А. Д.</b>	196 – 208	<b>Obukhov A. D.</b>
<b>Орехов В. С.</b>	471 – 480	<b>Orekhov V. S.</b>
<b>Орлова Н. В.</b>	274 – 279	<b>Orlova N. V.</b>
<b>Орлова Н. В.</b>	295 – 299	<b>Orlova N. V.</b>
<b>Осиленкер Б. П.</b>	135 – 148	<b>Osilenker B. P.</b>
<b>Осипов Н. Н.</b>	129 – 134	<b>Osipov N. N.</b>
<b>П</b>		<b>P</b>
<b>Павлов В. И.</b>	216 – 224	<b>Pavlov V. I.</b>
<b>Панасюк Ю. Н.</b>	595 – 600	<b>Panasyuk Yu. N.</b>
<b>Парфенова Е. А.</b>	656 – 664	<b>Parfenova E. A.</b>
<b>Перельгин Д. Н.</b>	452 – 460, 680 – 687	<b>Perelygin D. N.</b>
<b>Поздникин А. О.</b>	280 – 287	<b>Pozdnikin A. O.</b>

Поликарпов В. М. 641 – 655  
 Поляков Д. В. 48 – 60  
 Пономарев С. В. 077 – 084  
 Попов А. И. 48 – 60, 196 – 208  
 Попов Р. В. 288 – 294  
 Потлов А. Ю. 581 – 588  
 Продан В. Д. 156 – 164  
 Промтов М. А. 265 – 273, 412 – 419  
 Проценко И. Г. 171 – 179  
 Пудовкин А. П. 595 – 600

## Р

Рогачёв А. И. 595 – 600  
 Рогов И. В. 6 – 11  
 Родина А. А. 518 – 526, 688 – 697  
 Родионов Ю. В. 280 – 287, 338 – 347  
 Романова Е. В. 420 – 427  
 Рухов А. В. 104 – 110  
 Рыжкин В. Ю. 280 – 287  
 Рязанцев С. В. 572 – 580

## С

Савельев Е. А. 672 – 679  
 Савин К. Н. 712 – 713  
 Святский В. М. 300 – 306  
 Святский М. А. 300 – 306  
 Севостьянов В. С. 680 – 687  
 Севостьянов М. В. 452 – 460  
 Селиванов Ю. Т. 280 – 287  
 Селиванова З. М. 12 – 24  
 Сентяков Б. А. 300 – 306  
 Сентяков К. Б. 300 – 306  
 Сизикин А. Ю. 402 – 411, 617 – 625  
 Симанин Н. А. 338 – 347  
 Синдеев С. В. 25 – 32, 581 – 588  
 Скворцов С. А. 548 – 556  
 Скопинцев И. В. 165 – 170, 665 – 671  
 Соколов М. В. 440 – 451  
 Степанов А. Ю. 265 – 273  
 Стреха А. А. 402 – 411, 617 – 625  
 Суханова Н. В. 481 – 487  
 Сухорукова Т. А. 129 – 134

## Т

Таршис М. Ю. 428 – 439  
 Тётушкин В. А. 402 – 411  
 Тихомиров С. Г. 572 – 580  
 Ткачев А. Г. 461 – 470

## У

Уральский В. И. 680 – 687

## Ф

Федосова Е. О. 149 – 155, 332 – 337  
 Филатов И. С. 707 – 711  
 Фирсова А. В. 180 – 187, 348 – 355, 527 – 534

Polikarpov V. M.  
 Polyakov D. V.  
 Ponomarev S. V.  
 Popov A. I.  
 Popov R. V.  
 Potlov A. Yu.  
 Prodan V. D.  
 Promtov M. A.  
 Protsenko I. G.  
 Pudovkin A. P.,

## R

Rogachev A. I.  
 Rogov I. V.  
 Rodina A. A.  
 Rodionov Yu. V.  
 Romanova E. V.  
 Rukhov A. V.  
 Ryzhkin V. Yu.  
 Ryazanzev S. V.

## S

Savelieva E. A.  
 Savin K. N.  
 Svyatsky V. M.  
 Svyatsky M. A.  
 Sevostyanov V. S.  
 Sevostyanov M. V.  
 Selivanov Yu. T.  
 Selivanova Z. M.  
 Sentyakov B. A.  
 Sentyakov K. B.  
 Sizikin A. Y.  
 Simanin N. A.  
 Sindeev S. V.  
 Skvortsov S. A.  
 Skopintsev I. V.  
 Sokolov M. V.  
 Stepanov A. Yu.  
 Strekha A. A.  
 Sukhanova N. V.  
 Sukhorukova T. A.

## T

Tarshis M. Yu.  
 Tyotushkin V. A.  
 Tikhomirov S. G.  
 Tkachev A. G.

## U

Uralsky V. I.

## F

Fedosova E. O.  
 Filatov I. S.  
 Firsova A. V.

<b>Фомин В. И.</b>	307 – 311
<b>Форгани М. А.</b>	61 – 71
<b>Фролов С. В.</b>	25 – 32, 581 – 588
<b>Х</b>	
<b>Хмелев В. Н.</b>	111 – 119
<b>Хоан Т. А.</b>	12 – 24
<b>Худорожков О. В.</b>	33 – 47
<b>Ч</b>	
<b>Черемухин В. В.</b>	165 – 170
<b>Черкасова А. С.</b>	707 – 711
<b>Чернышов В. Н.</b>	390 – 401
<b>Чернышова Т. И.</b>	209 – 215, 589 – 594
<b>Ш</b>	
<b>Шалунов А. В.</b>	111 – 119
<b>Шалунова А. В.</b>	111 – 119
<b>Шачнев О. Я.</b>	247 – 251
<b>Шевцова О. В.</b>	274 – 279, 295 – 299
<b>Шелохвостов В. П.</b>	390 – 401
<b>Шишкина Г. В.</b>	557 – 571
<b>Щербатов И. А.</b>	557 – 571
<b>Яковлев П. А.</b>	626 – 634
<b>Ященко А. Г.</b>	274 – 279, 295 – 299

<b>Fomin V. I.</b>	
<b>Forgani M. A.</b>	
<b>Frolov S. V.</b>	
<b>Kh</b>	
<b>Khmelev V. N.</b>	
<b>Hoang T. A.</b>	
<b>Khudorozhkov O. V.</b>	
<b>Ch</b>	
<b>Cheryomukhin V. V.</b>	
<b>Cherkasova A. C.</b>	
<b>Chernyshov V. N.</b>	
<b>Chernyshova T. I.</b>	
<b>Sh</b>	
<b>Shalunov A. V.</b>	
<b>Shalunova A. V.</b>	
<b>Shachnev O. Ya.</b>	
<b>Shevtsova O. V.</b>	
<b>Shelokhvostov V. P.</b>	
<b>Shishkina G. V.</b>	
<b>Shcherbatov I. A.</b>	
<b>Yakovlev P. A.</b>	
<b>Yashchenko A. G.</b>	