

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Администрация Тамбовской области  
Неправительственный экологический фонд имени В. И. Вернадского  
Ассоциация «Объединенный университет имени В. И. Вернадского»  
**ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»**  
ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет»  
ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт  
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве»

**В. И. ВЕРНАДСКИЙ:  
УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНОВ**

**V. I. VERNADSKY:  
SUSTAINABLE DEVELOPMENT  
OF THE REGIONS**

**Материалы Международной научно-практической конференции**

**Том 4**

Научное электронное издание комплексного распространения



---

**Тамбов**  
**Издательство ФГБОУ ВО «ТГТУ»**  
**2016**

УДК 504(0.034)

ББК Б1я43+з6я43+У28я43

В11

Редакционная коллегия:

*В. А. Грачев* – президент и генеральный директор Неправительственного экологического фонда имени В. И. Вернадского, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., *М. Н. Краснянский* – ректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», президент Ассоциации «Объединенный университет имени В. И. Вернадского», д-р техн. наук, проф. РАН, *Н. В. Молоткова* – первый проректор ФГБОУ ВО «ТГТУ», чл.-корр. РАЕН, д-р пед. наук, проф., *Д. Ю. Муромцев* – проректор по научно-инновационной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф., *Е. С. Мищенко* – проректор по международной деятельности ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р экон. наук, проф., *В. Ф. Калинин* – вице-президент Ассоциации «Объединенный университет имени В. И. Вернадского», советник при ректорате ФГБОУ ВО «ТГТУ», д-р техн. наук, проф., *А. В. Козачек* – исполнительный директор Ассоциации «Объединенный университет имени В. И. Вернадского», доц. кафедры «Природопользование и защита окружающей среды» ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. пед. наук, доцент, *Д. О. Завражин* – начальник отдела научно-технических программ ФГБОУ ВО «ТГТУ», канд. техн. наук, доц.

В11 В. И. Вернадский: устойчивое развитие регионов [Электронный ресурс] : материалы Международной научно-практической конференции. В 5 т. Т. 4 / под науч. ред. В. А. Грачева, М. Н. Краснянского, Н. В. Молотковой и др. ; отв. ред. А. В. Козачек ; Междунар. науч.-практ. конф., 7 – 9 июня 2016 г., г. Тамбов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод. – 00,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана. – 100 шт.  
ISBN 978-5-8265-1633-1; ISBN 978-5-8265-1637-9

Отражены результаты научных разработок ученых в области устойчивого развития регионов.

В четвертый том сборника трудов вошли научные работы, посвященные инженерным процессам и технологиям защиты окружающей среды, энерго- и ресурсосбережения (очистка сточных вод и водоподготовка, очистка газовых выбросов, переработка отходов, малоотходные производства), математическому моделированию и имитационному исследованию, теории и практике эксперимента в экологии и природоохранной деятельности.

Предназначены для ученых и преподавателей, а также всех интересующихся вопросами устойчивого регионального развития.

УДК 504(0.034)

ББК Б1я43+з6я43+У28я43

*Подготовлены по материалам, предоставленным в электронном варианте, и сохраняют авторскую редакцию.*

*Оргкомитет, Программный комитет, Секретариат конференции и редакция ответственности за содержание предоставленных авторами материалов не несут.*

ISBN 978-5-8265-1637-9 (т. 4)

ISBN 978-5-8265-1633-1

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

---

|                                                                                                                                                                                                                         |          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Инженерные процессы и технологии защиты окружающей среды, энерго- и ресурсосбережения (очистка сточных вод и водоподготовка, очистка газовых выбросов, переработка отходов, малоотходные производства) . . . . .</b> | <b>6</b> |
| <i>Косарев А. В.</i> Промышленно-экологические аспекты в кинетике отверждения олигомерных смол . . . . .                                                                                                                | 6        |
| <i>Назмиева А. И., Мусина Л. Р., Галиханов М. Ф., Минзагирова А. М.</i> Получение экологически чистого, биоразлагаемого материала на основе бумаги и полилактида и исследование его свойств . . . . .                   | 10       |
| <i>Романова С. М., Павлова Д. И., Ишмаева Г. Ф.</i> Утилизация порохов, с истекшим сроком хранения методом химической модификации . . . . .                                                                             | 14       |
| <i>Бабкин В. Ф., Евсеев Е. П., Захаров П. Д.</i> Энергосберегающие технологии очистки сточных вод . . . . .                                                                                                             | 19       |
| <i>Абоносимов Д. О., Лазарев С. И.</i> Энергосберегающие электробаромембранные технологии в очистке сточных вод гальванопроизводств . . . . .                                                                           | 24       |
| <i>Алексеева Н. В., Бахтурина И. А.</i> Уменьшение водопотребления при производстве пигментов . . . . .                                                                                                                 | 29       |
| <i>Банин Р. Ю., Черных Е. А., Ловягина Е. Ю.</i> К вопросу снижения удельного энергопотребления при сушке жидкой послеспиртовой барды . . . . .                                                                         | 32       |
| <i>Вязовов С. А.</i> Исследование кинетических характеристик обратноосмотической очистки водных белофоросодержащих растворов . . . . .                                                                                  | 36       |
| <i>Глазунова И. В.</i> Применение адсорбентов на основе природных ископаемых Липецкой области в природоохранных технологиях . . . . .                                                                                   | 42       |
| <i>Доровских Д. В.</i> Пневматическое транспортирование и сепарация отходов производства щебня . . . . .                                                                                                                | 46       |
| <i>Ковалев С. В., Попов Р. В., Ковалева О. А., Лазарев Д. С.</i> Конструкция электробаромембранного аппарата для разделения растворов машиностроительных производств . . . . .                                          | 52       |
| <i>Кучерова А. Е., Герасимова А. В., Бураков А. Е., Романцова И. В., Мележик А. В.</i> Кинетика адсорбции Pb(II) из водных растворов нанокompозитным сорбентом на основе графена . . . . .                              | 57       |
| <i>Нескоромная Е. А., Бабкин А. В., Бураков А. Е., Романцова И. В.</i> Инновационные наносорбенты для решения экологических проблем . . . . .                                                                           | 63       |
| <i>Скопинцева Т. В., Козачек А. С., Конькова К. А.</i> Подбор оборудования для переработки сточных вод и осадков сточных вод в удобрения . . . . .                                                                      | 68       |
| <i>Шестаков К. В., Лазарев С. И.</i> Исследование кинетических характеристик обратноосмотического разделения промышленных растворов, содержащих никель . . . . .                                                        | 73       |
| <i>Щербаков В. И., Аль-Амри З.</i> Исследование методов кондиционирования опресненной воды для питьевых нужд (в условиях Ирака) . . . . .                                                                               | 78       |
| <i>Доровских Д. В., Таджил Рахман Шати Таджил, Чернецов Д. А.</i> Перспективные системы очистки отработавших газов дизельных двигателей автомобилей . . . . .                                                           | 84       |

|                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Загородникова М. А., Ярцев В. П., Максимова А. А.</i> Химическая стойкость и экологическая безопасность ПВХ-мембран в конструкциях очистных сооружений агропромышленного комплекса . . . . .                                   | 89  |
| <i>Муратова Н. С., Климов Д. В.</i> Использование низкотемпературного кипящего слоя для утилизации биогенных отходов . . . . .                                                                                                    | 95  |
| <i>Беляев П. С., Макеев П. В., Устьян Е. В.</i> Исследование процесса получения композиционного материала на основе отходов ЦСП и вторичного полипропилена . . .                                                                  | 100 |
| <i>Рухов А. В.</i> Экологические аспекты промышленного производства углеродных нанотрубок методом газофазного химического осаждения . . . . .                                                                                     | 104 |
| <i>Полуэктов В. Л., Полуэктова С. Л., Баронин Г. С., Бузник В. М.</i> Экологические аспекты применения новой технологии для переработки нанокompозитов . . . . .                                                                  | 110 |
| <i>Кольцов М. А.</i> Оборудование для синтеза малослойных углеродных нанотрубок. Воздействие на окружающую среду . . . . .                                                                                                        | 115 |
| <i>Образцова Е. Ю.</i> Снижение экологической нагрузки производства катализаторов для синтеза углеродных наноматериалов . . . . .                                                                                                 | 118 |
| <i>Орлова М. С., Пилягина А. О.</i> Газовый разряд как технологический инструмент очистки воздуха от вредных примесей . . . . .                                                                                                   | 123 |
| <b>Математическое моделирование и имитационное исследование, теория и практика эксперимента в экологии и природоохранной деятельности . . . . .</b>                                                                               | 127 |
| <i>Седых И. А., Шмырин А. М.</i> Математическое моделирование максимальной концентрации выбросов при производстве клинкера . . . . .                                                                                              | 127 |
| <i>Акулинин Е. И., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И.</i> Моделирование и оптимизация процесса разделения воздуха методом короткоциклового безнагревной адсорбции . . . . .                                                         | 132 |
| <i>Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Акулинин Е. И., Плотников М. Ю., Толстых С. Г.</i> Моделирование нестационарного процесса химической регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах . . . . .                          | 139 |
| <i>Ерохин Г. Н., Коновский В. В.</i> Моделирование расхода топлива комбайном при уборке зерновых культур . . . . .                                                                                                                | 146 |
| <i>Шмырин А. М., Мишачев Н. М., Косарева А. С.</i> Окрестностные системы в экологии . . . . .                                                                                                                                     | 151 |
| <i>Артемова С. В., Артемов А. А., Каменская М. А., Зайни А., Рязанов А. С.</i> Интеллектуализация синтеза решения задач управления энергоемкими объектами . . . . .                                                               | 153 |
| <i>Абоносимов О. А., Лазарев С. И., Козлов А. А., Абоносимов Д. О., Стрельников А. Е.</i> Математическое моделирование гидродинамической структуры потока раствора в обратноосмотических модулях . . . . .                        | 157 |
| <i>Голубятников О. О., Дубровин В. В.</i> Математическая модель интеллектуальной поддержки принятия решений для формирования индивидуальной комплексной методики проведения экспресс-оценки состояния здоровья человека . . . . . | 162 |
| <i>Бадирова Н. Б., Тялина Л. Н.</i> Моделирование системы NI-CO-MO-V в NI-CO содержащем кеке . . . . .                                                                                                                            | 168 |
| <i>Данилина Ж. С., Третьяков А. А.</i> Математическое моделирование и имитационное исследование процесса сульфирования при производстве сульфаминовой кислоты . . . . .                                                           | 174 |
| <i>Майстренко А. В., Майстренко Н. В.</i> Разработка информационных систем моделирования и проектирования ресурсосберегающих ХТП на основе объектно-ориентированного подхода . . . . .                                            | 180 |
| <i>Негуляева А. П.</i> Алгоритм автономного контроля целостности навигационных данных СРНС. Метод невязок . . . . .                                                                                                               | 183 |

|                                                                                                                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Подколзина Л. А.</i> Определение фактических характеристик точности углового канала навигационных систем подвижных наземных объектов . . . . .                                                                                  | 189 |
| <i>Сазонова Д. Д., Сазонов С. Н.</i> Анализ производственной функции, построенной по результатам деятельности фермерских хозяйств . . . . .                                                                                        | 192 |
| <i>Фролов С. В., Синдеев С. В.</i> Использование высокопроизводительных вычислений при решении задач механики сплошной среды в экологии . . . . .                                                                                  | 199 |
| <i>Литовка Ю. В., Као В. З.</i> Оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами и биполярными электродами для энергосбережения и экономии металлов покрытия . . . . .                                                  | 203 |
| <i>Яровая Т. С., Антонов А. И.</i> Математическое моделирование прямого звука при экологической оценке шумового режима в зданиях с массовым пребыванием людей . . . . .                                                            | 205 |
| <i>Карпушкин С. В., Семилетов А. В., Коняхин А. В.</i> Применение системы конечно-элементного анализа для моделирования тепловых и гидродинамических процессов в вертикальной емкости . . . . .                                    | 210 |
| <i>Карпушкин С. В., Семилетов А. В., Коняхин А. В.</i> Моделирование полей температур и скоростей в теплообменнике «труба-в-трубе» с применением системы конечно-элементного анализа . . . . .                                     | 214 |
| <i>Бабичев А. М., Толстых С. Г., Подольский В. Е.</i> Метод оценки сложности высокоточных вычислений в распределенном режиме Информационная модель днищ емкостных аппаратов . . . . .                                              | 218 |
| <i>Горшкова Т. С., Елагин М. С., Орешкин А. С.</i> Информационная модель днищ емкостных аппаратов . . . . .                                                                                                                        | 222 |
| <i>Горшкова Т. С., Мокрозуб А. В., Храмцова Н. В.</i> Процедурная модель разработки технологии изготовления днищ емкостных аппаратов . . . . .                                                                                     | 225 |
| <i>Егоров С. Я., Бетин Е. А., Егоров С. Ю.</i> Информационная система выбора объемно-планировочных решений цеха . . . . .                                                                                                          | 229 |
| <i>Игумнов И. С., Данилов С. Н.</i> Синтез нечеткого регулятора беспилотного летательного аппарата дистанционного зондирования . . . . .                                                                                           | 233 |
| <i>Половнева Н. В., Ерохина И. Н., Никонова Н. А.</i> Функциональная модель проектирования технологии изготовления зубчатых колес . . . . .                                                                                        | 238 |
| <i>Фролова Т. А., Фролова М. С.</i> Информационная модель изделия медицинской техники на основе теоретико-множественного представления . . . . .                                                                                   | 241 |
| <i>Чернышов В. А., Семенов А. Е., Печагин Е. А.</i> Способ управления беспилотным летательным аппаратом, осуществляющим мониторинг технического состояния ВЛ 6-10 КВ при потере радиосвязи с наземным пунктом управления . . . . . | 247 |

**ИНЖЕНЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ, ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ  
(ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД И ВОДОПОДГОТОВКА,  
ОЧИСТКА ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ, ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ,  
МАЛООТХОДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА)**

---

УДК 53:541.6

ББК 37.86.

**Косарев А. В.**

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.  
(Россия, г. Саратов)

**ПРОМЫШЛЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
В КИНЕТИКЕ ОТВЕРЖДЕНИЯ ОЛИГОМЕРНЫХ СМОЛ**

**Kosarev A. V.**

Yuri Gagarin Saratov State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov)

**INDUSTRIAL AND ECOLOGICAL ASPECTS  
IN THE KINETICS OF RESIN OLIGOMER CURING**

*Аннотация.* Разработаны модельные подходы, позволяющие определить роль кинетического фактора в экологической безопасности процесса отверждения олигомерных смол. Результаты работы позволяют определить содержание свободных олигомерных смол в сетчатом продукте.

*Ключевые слова:* промышленная экология, олигомер, отверждение, моделирование.

*Abstract.* Modeling approaches allow you to define the role of kinetic factor in environmental security process curing resin oligomer. We got the equations characterizing degree of volumetric proportion of oligomer, cured in a polymeric product.

*Keywords:* industrial ecology, oligomer, curing, modeling.

Отверждение олигомерных смол является одним из процессов, играющих важную роль в промышленной экологии и химической технологии производства полимерных материалов. По механизму отверждения происходит формирование полимерных материалов на основе термореактопластов, при формировании изделий из реактопластов, процессы склеивания, герметизации и формирования лаковых пленок. Нами разработаны математические модели, характеризующие отверждение смол ЭД-20, СФ-342А, ПН-15. Найдены соотношения для объемов глобулярной фазы отвержденных смол как функция молекулярных параметров отверждающейся системы (молекулярного объема,

функциональности), определены объемные доли отвержденной фазы. Моделирование процесса отверждения реализовывалось в рамках глобулярного подхода к формированию структуры сетчатого полимера [1, 2]. Общий алгоритм моделирования включал в себя следующие стадии: составление кинетической схемы отверждения; выбор фрагмента молекулярной структуры, отвечающего слою отверждения, нахождения объема формирующейся глобулярной фазы как функции числа ее слоев; нахождение изменения объема полимерной фазы из кинетических данных процесса отверждения, определение максимального количества слоев глобулярной системы в точке гелеобразования, определение объемной доли олигомерной смолы, отвержденной в сетчатый продукт. При рассмотрении отверждения смолы ЭД-20 учитывалось, что этот процесс протекает по механизму поликонденсации с отвердителем ПЭПА, для смолы СФ-342А – по механизму поликонденсации без отвердителя, для смолы ПН-15 – по свободнорадикальному механизму в присутствии стирола.

Рассмотрим процесс отверждения смолы ЭД-20 в присутствии отвердителя ПЭПА. Выражение для объема  $V_p$  полимерной фазы, формирующейся в ходе отверждения, имеет вид:

$$V_p = \omega N_h \left[ V_h + \varphi_h \left( \sum_i^{n/2} 3^{i-1} V_{ol} + \sum_j^{n/2} 3^{j-1} V_h \right) \right], \quad (1)$$

где  $\omega$  – мольная доля активированных молекул отвердителя;  $N_h$  – общее число молекул отвердителя в системе;  $V_{ol}$  и  $V_h$  – объемы молекул олигомера и отвердителя соответственно;  $\varphi_h$  – функциональность молекул отвердителя;  $n$  – число слоев глобулы отвержденной системы в точке гелеобразования.

С другой стороны, величина объема  $V_p$  может быть задана в рамках кинетической модели соотношением:

$$V_p = V_0 (1 - e^{-k_p \tau}), \quad (2)$$

где  $V_0$  – объем смолы до отверждения;  $k_p$  – константа скорости отверждения;  $\tau$  – время гелеобразования. Сопоставление уравнений (1) и (2) позволяет найти вид выражения для максимального числа слоев  $n$  глобулы в точке гелеобразования:

$$n = 2 \left( 1 + \frac{\lg \chi}{\lg 3} \right), \quad (3)$$

где  $\chi$  – параметр, учитывающий фактор структуры в процессе отверждения:

$$\chi = \frac{2}{(V_{ol} + V_h) \varphi_h} \left[ \frac{V_0 (1 - e^{-k_p \tau})}{\omega N_h} - V_h \right]. \quad (4)$$

Величина  $w_r$  объемной доли смолы ЭД-20, отвержденной в сетчатый продукт может быть найдена следующим образом:

$$w_r = 1 - e^{-k_p \tau}. \quad (5)$$

Рассмотрим теперь процесс отверждения смолы СФ-342А в присутствии отвердителя ПЭПА. Данная реакция протекает без участия отвердителя по механизму поликонденсации, с образованием воды в качестве побочного продукта. Выражение для объема  $V_p$  полимерной фазы, формирующейся в ходе отверждения, имеет вид:

$$V_p = 3 \cdot 2^{n-2} V_m \omega N_0, \quad (6)$$

где  $V_m$  – объем молекулы олигомерной смолы;  $\omega$  – мольная доля активированных молекул олигомерной смолы;  $N_0$  – общее число молекул олигомерной смолы в системе;  $n$  – число олигомерных слоев в глобулярной структуре в точке гелеобразования.

Величина  $V_p$ , найденная в рамках кинетической модели, задается выражением (2). Тогда величина  $n$  определяется следующим образом:

$$n = 2 + \frac{\lg \chi}{\lg 2}, \quad (7)$$

где фактор структуры  $\chi$  задается следующим образом:

$$\chi = \frac{V_0(1 - e^{-k_p \tau})}{3V_m \omega N_0}. \quad (8)$$

Величина  $w_r$  объемной доли смолы СФ-342А, отвержденной в сетчатый продукт задается соотношениям (5).

Рассмотрим теперь процесс отверждения полиэфирной смолы ПН-15. Он осуществляется по свободнорадикальному механизму в присутствии стирола в качестве сшивающего агента. Объем полимерной фазы  $V_p$  составит:

$$V_p = 2\omega N \phi_r (V_1 + V_2)(\phi_r - 1)^{n-5}, \quad (9)$$

где  $\omega$  – мольная доля активированных молекул олигомера;  $N$  – общее количество молекул олигомера;  $V_1$  – объем структурного элемента молекулы олигомерной смолы;  $V_2$  – объем молекулы стирола соответственно;  $\phi_r$  – функциональность молекул олигомера;  $n$  – максимальное число слоев глобулярной системы в точке гелеобразования.

Величина  $n$  определяется согласно выражению:

$$n = \frac{\lg V_p - \lg \chi}{\lg((\phi_r - 1))} + 5, \quad (10)$$

где фактор структуры  $\chi$  задается следующим образом:

$$\chi = \omega N \phi_r (V_1 + V_2). \quad (11)$$

С помощью кинетического моделирования нами показано, что объем стирола, израсходованного на отверждение смолы ПН-15 в точке гелеобразования, задается соотношением:

$$V_{s\tau} = v\tau, \quad (12)$$

где  $v$  – объемная скорость расходования стирола,  $\tau$  – время достижения точки гелеобразования.

$$V_r = V_{0r} \exp\left(-k_p v \frac{\tau^2}{2}\right), \quad (13)$$

где  $V_{0r}$  – объем исходной (неотвержденной) олигомерной смолы;  $k_p$  – константа скорости отверждения.

Величины объемных долей  $w_s$  стирола и  $w_r$  смолы ПН-15, отвержденной в сетчатый продукт определяются следующим образом:

$$w_s = \frac{V_{s\tau}}{V_{s0}}; \quad (14)$$

$$w_r = \frac{V_r}{V_{r0}}. \quad (15)$$

Данная модель позволяет прогнозировать изменение технологических параметров отверждения до точки гелеобразования, и актуальна для решения задач химической технологии и полимерного материаловедения.

#### *Список использованных источников*

1. Kosarev, A. V. Adsorption efficiency for adsorption of a series of oligomer resins on reinforcing yarns / A. V. Kosarev, V. N. Stoudentsov, D. K. Budyak // *Fibre Chemistry*. – 2014. – V. 45, N 6. – P. 372 – 375.
2. Irzhak, V. I. Structural aspects of polymer network formation upon curing of oligomer systems / V. I. Irzhak, S. M. Mezhevikovskii // *Russian Chemical Reviews*. – 2009. – V. 78, № 2. – P. 165 – 194.

УДК 504.0646

ББК Л716

**Назмиева А. И., Мусина Л. Р., Галиханов М. Ф., Минзагирова А. М.**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»  
(Россия, г. Казань)

**ПОЛУЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО,  
БИОРАЗЛАГАЕМОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ БУМАГИ  
И ПОЛИЛАКТИДА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ**

**Nazmieva A. I., Musina L. ., Galikhanov M. F., Minzagirova A. M.**

Kazan National Research Technological University  
(Russia, Kazan)

**MANUFACTURING OF ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY  
BIODEGRADABLE MATERIAL BASED ON PAPER  
AND POLYLACTIC ACID AND INVESTIGATION OF ITS PROPERTIES**

*Аннотация.* Рассмотрен способ получения биоразлагаемого материала на основе целлюлозно-бумажного материала и полилактида. Исследованы электретные характеристики и впитываемость при полном погружении полученного материала, при обработке в поле коронного разряда.

*Ключевые слова:* биоразлагаемый материал, полилактид, целлюлозно-бумажный материал, поверхностная обработка, униполярный коронный разряд.

*Abstract.* Biodegradable material manufacturing method based on paper and polylactic acid was considered. Electret properties and absorption by full immersion of the corona-treated material were measured.

*Keywords:* biodegradable material, polylactic acid, pulp and paper material, surface treatment, unipolar corona discharge

Мировое употребление пластмасс, на основе синтетических полимеров, в большом масштабе привели к возникновению серьезных экологических проблем. Синтетические полимеры при утилизации (захоронении) практически не разлагаются на полигонах твердых бытовых отходов. Поэтому в последнее время большое внимание уделяется развитию производств по получению биоразлагаемых полимеров, например, полилактида, с заранее заданным временем жизни для различных областей применения. Полилактид получают из возобновляемого растительного сырья, и он обладает физико-механическими свойствами, не уступающими традиционным синтетическим полимерам, и перерабатывается в изделия всеми методами переработки пластмасс.

Так же растет использование таких материалов, как целлюлоза, макулатура, вторичное сырье, получаемая из природного восстанавливаемого сырья. Целлюлозно-

бумажные материалы очень востребованы благодаря своим прочностным свойствам, легкости, дешевизне, удобству при эксплуатации и транспортировке. Среди них можно выделить мешочную бумагу [1].

Многослойные листы на основе бумаги и полилактида могут стать перспективным материалом для использования во многих отраслях промышленности и при этом обладать биоразлагаемостью.

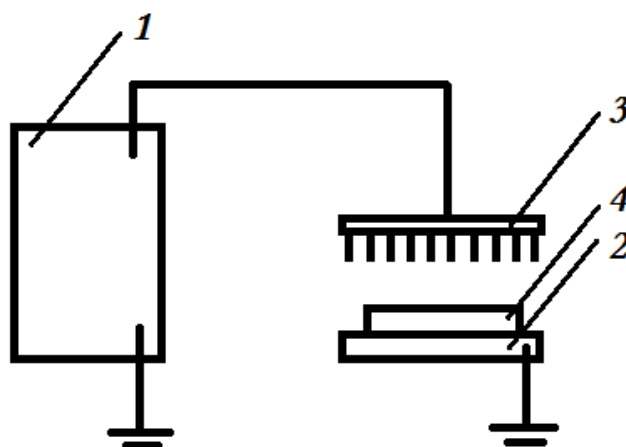
В то же время, встречаются работы, изучающие влияние физических полей различной природы на те или иные свойства целлюлозно-бумажных материалов [2 – 5], в том числе – униполярного коронного разряда [4, 5].

Основной целью данной работы является повышение эксплуатационных свойств мешочной бумаги при ламинировании ее поверхности полилактидом и действии униполярного коронного разряда.

Объектами исследования были выбраны мешочная бумага марки М-78 с плотностью 78 г/м<sup>2</sup> и L-полилактид. Нанесение полимерного покрытия на поверхность мешочной бумаги (образцы размерами 7×7 см) осуществлялось из 3% раствора полилактида в хлороформе. Толщина нанесенного покрытия составляет 1...2 мкм. После нанесения покрытия и испарения растворителя образцы подвергались электретированию в отрицательном коронном разряде. Для этого часть готовых образцов с покрытием и без покрытия помещали в коронирующую ячейку с электродом, состоящим из 196 заостренных игл, равномерно расположенных по площади 49 см<sup>2</sup> в виде квадрата при подаваемом напряжении 30 кВ в течение 30 с.

Измерение потенциала поверхности  $V_s$ , напряженности электрического поля  $E$  и эффективной поверхностной плотности заряда  $\sigma_{эф}$  бумаги осуществляли компенсационным методом (экранирование приемного электрода) на приборе ИПЭП-1 через час после действия униполярного коронного разряда (табл. 1).

Испытание на определение впитываемости при полном погружении проводили по ГОСТ 13648.5–78.



**Рис. 1. Схема коронатора:**

1 – источник высокого напряжения; 2 – заземленный электрод;  
3 – коронирующий электрод; 4 – образец

**1. Электретные характеристики бумажно-целлюлозных материалов  
с полилактидным покрытием сразу после действия  
отрицательного коронного разряда и через 25 суток**

| Электретные свойства                 | на 1-е сутки | на 25-е сутки |
|--------------------------------------|--------------|---------------|
| $V_3$ , В                            | 15           | 8             |
| $E$ , кВ/м                           | 1,0          | 0,6           |
| $\sigma_{эф}$ , мк·Кл/м <sup>2</sup> | 0,008        | 0,005         |

Плохая электретируемость целлюлозы и полилактида, как полярных диэлектриков в коронном разряде, предсказуемо [6]. Надо учитывать, что поляризация в коронном разряде протекает, в том числе, за счет инжекции носителей зарядов различного типа (например, электронов, ионов), и фиксации их на энергетических ловушках. В ходе релаксации заряда (деполяризации электрета) происходит диффузия носителей заряда к поверхности диэлектрика (процесс перзахвата) и его высвобождение из объема полимера. Скорость этого процесса определяется величиной удельной объемной электрической проводимости материала, которая у полярных материалов относительно высока.

Нанесение на поверхность полимерного покрытия на основе полилактида уменьшает впитываемость при полном погружении на 9%. А при условии обработки полученного образца в поле коронного разряда впитываемость при полном погружении уменьшилось еще на 2%.

Наблюдается уменьшение впитываемости при полном погружении за счет образования полимерной пленки на поверхности материала.

*Выводы по работе.* Полученный биоразлагаемый материал можно использовать для производства многослойных мешков, для упаковки как пищевых продуктов, так и продуктов других сфер производства.

*Список использованных источников*

1. Кларк, Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытаний) / пер. с англ. А. В. Оболенской и Г. А. Пазухиной. – М. : Лесная промышленность, 1983. – 456 с.
2. Ажаронк, В. В. Изменение оптических свойств бумаги под влиянием магнитной составляющей высокочастотного электромагнитного поля / В. В. Ажаронк, И. И. Филатова, И. В. Вошула, В. А. Длугунович, О. В. Царюк, Т. Н. Горжанова // Журнал прикладной спектроскопии. – 2007. – Т. 74, № 4. – С. 421 – 426.
3. Вураско, А. В. Повышение сорбционных свойств технической целлюлозы из недревесного растительного сырья / А. В. Вураско, Е. И. Фролова, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 41 – 43.
4. Перепелкина, А. А. Влияние термической обработки и электрофизического воздействия на сопротивление продавливанию целлюлозно-бумажного материала /

А. А. Перепелкина, М. Ф. Галиханов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 7. – С. 113–114.

5. Мусина, Л. Р. Применение электретиrowания как способа упрочнения комбинированного гофрированного картона // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 10. – С. 45 – 47.

6. Муслимова, А. А. Изучение электретных свойств коронoeлектретов на основе полилактида / А. А. Муслимова, А. П. Виранева, Т. А. Йовчева, М. Ф. Галиханов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 10. – С. 128 – 130.

### *References*

1. Clark, J. Pulp Technology & Treatment for Paper. 2<sup>d</sup> edition – San Francisco : Miller Freeman Publications, 1985. – 878 p.

2. Azharonok, V. V. Change in the optical properties of paper when exposed to the magnetic component of a high-frequency electromagnetic field / V. V. Azharonok, I. I. Filatova, I. V. Voshchula, V. A. Dlugunovich, O. V. Tsaryuk, T. N. Gorzhanova // Journal of Applied Spectroscopy. – 2007. – V. 74, N 4. – P. 465 – 471.

3. Vurasko, A. V. Increase of sorption properties of the non-wood pulp / A. V. Vurasko, E. I. Frolova, O. V. Stoyanov // Herald of Kazan Technological University. – 2014. – V.17, N 1. – P. 41 – 43 (in Russian).

4. Perepelkina, A. A. Effect of thermal and electrophysical treatment on resistance to bursting of the pulp and paper material / A. A. Perepelkina, M. F. Galikhanov // Herald of Kazan Technological University. – 2013. – V. 16, N 7. – P. 113–114 (in Russian).

5. Musina, L. R. Application of corona treatment as a strengthening method for composite corrugated cardboard // Herald of Kazan Technological University. – 2014. – V. 17, N 10. – С. 45 – 47 (in Russian).

6. Muslimova, A. A. Study of electret properties of corona electrets based on polylactic acid / A. A. Muslimova, A. P. Viraneva, T. A. Yovcheva, M. F. Galikhanov // Herald of Kazan Technological University. – 2012. – V. 15, N 10. – P. 128 – 130 (in Russian).

УДК 661.728.86  
ББК 24.7

**Романова С. М., Павлова Д. И., Ишмаева Г. Ф.**  
Казанский национальный исследовательский технологический университет»  
(Россия, г. Казань)

## **УТИЛИЗАЦИЯ ПОРОХОВ, С ИСТЕКШИМ СРОКОМ ХРАНЕНИЯ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ**

**Romanova S. M., Pavlova D. I., Ishmaeva G. F.**  
Kazan National Research Technological University  
(Russia, Kazan)

### **UTILIZATION OF GUNPOWDER WITH THE EXPIRED PERIOD OF STORAGE BY METHOD OF CHEMICAL MODIFICATION**

*Аннотация.* С целью поиска рационального метода утилизации устаревших порохов были изучены реакции нитратов целлюлозы с 2,4,5-трибромимидазолом. На основании физико-химических методов анализа установлены структуры продуктов реакций и предложены наиболее вероятные пути протекания процесса.

*Ключевые слова:* утилизация порохов, нитрат целлюлозы, 2,4,5-трибромимидазол, химическая модификация.

*Abstract.* In order to find a rational method of disposing of outdated powders reactions of cellulose nitrate with 2,4,5-tribromimidazol were studied. On the basis of the physic chemical methods of analysis the structure of the reaction products was established and the most probable ways of the process were offered.

*Keywords:* powder recycling, cellulose nitrate, 2,4,5-tribromimidazol, chemical modification.

В настоящее время на складах и арсеналах Министерства обороны накоплено и хранится огромное количество пироксилиновых порохов, срок хранения которых давно истек. Тысячи тонн взрывчатых веществ с течением времени разлагаются, создавая угрозу взрыва, а применяемые к ним методы уничтожения являются радикальными и нерациональными. Например, широко применяемые методы сжигания или подрыва являются опасными не только с технологической, но и с экологической точек зрения [1].

Поэтому большое внимание уделяется возможности утилизации нитратцеллюлозных порохов путем химической модификации различными соединениями и использования полученных продуктов в народном хозяйстве [2 – 4].

В литературе описана химическая модификация нитратов целлюлозы (НЦ) различными реагентами с получением смешанных эфиров, например, с ангидридами карбоновых кислот, спиртами, эпоксидной смолой, капролактамом. Полученные модификаты НЦ обладают отличными от исходного полимера свойствами: широким диапазоном регулирования скорости горения, повышенной адгезией к твердым поверхностям. Они могут использоваться в качестве полимерной основы твердых покрытий, клеев, лаков, красок [5 – 6].

Целью данного исследования является изучение химического взаимодействия высокоазотного НЦ с 2,4,5-трибромимидазолом с применением различных физико-химических методов анализа.

Из литературы [5, 7] известно, что введение азотсодержащих гетероциклов в структуру НЦ придает полимеру ионнообменные свойства. Подобные модификаты используются для хроматографического разделения биологических препаратов в медицине.

Имидазол и его производные являются субстратом для производства широкого спектра антибиотиков [8]. 2,4,5-трибромимидазол проявляет нейротоксическую активность (препарат Каутион), таким образом, введение его в структуру НЦ вероятнее всего придаст ему биоцидные свойства.

Синтез осуществлялся в гомогенной среде диметилформамида в соотношении 1 моль 2,4,5-трибромимидазола на каждую нитратную группу НЦ. Реакционную колбу с растворами исходных веществ нагревали на водяной бане при непрерывном перемешивании. Реакции вели при различном времени выдержки (1, 3, 5 ч) и температуре (60, 80 °С). Полученные продукты высаживали в дистиллированную воду, промывали трихлорметаном, высушивали до постоянной массы. Продукты представляют собой порошок коричневого цвета, хорошо растворимый в ДМФА, ДМСО, ацетоне.

Для исследования строения и структуры полимерных продуктов применялись: ИК-, ЯМР  $^{13}\text{C}$ -спектроскопии, элементный анализ, вискозиметрия.

На основании элементного анализа были рассчитаны эмпирические формулы элементарных звеньев синтезированных полимеров.

Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют об изменении строения полимера, так как спектры полученных продуктов содержат полосы поглощения, характерные не только для валентных и деформационных колебаний связей исходного НЦ, но и для 2,4,5-трибромимидазола (680...515  $\text{см}^{-1}$  – валентные колебания C–Br; 1250-1180 – валентные колебания связи C–N и 1660-1480 –  $\text{см}^{-1}$  – валентные колебаниям двойных связей C=N в кольце).

На спектре ЯМР  $^{13}\text{C}$  помимо сигналов, соответствующих углеродам исходного НЦ, различимы сигналы, отнесенные к углеродам гетероциклического фрагмента: 104,3 ( $\text{C}_5$ ), 117,75 ( $\text{C}_4$ ), 118,23 ( $\text{C}_2$ ).

Сравнивая характеристическую вязкость ацетоновых растворов НЦ и продуктов реакции, можно проследить изменение молекулярной массы полимеров. Данные вискозиметрического анализа показали, что вязкость растворов полученных продуктов снижается по сравнению с исходным полимером.

*Характеристика исходного нитрата целлюлозы:*

$\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{ONO}_2)_{2,54}(\text{OH})_{0,46}$ ;  $t_{\text{разл}}$  205...210 °С. Характеристическая вязкость ( $\eta$ ) 3,0. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 700...690, 750, 840, 1280, 1380, 1430, 1670...1650 ( $-\text{ONO}_2$ ,  $-\text{CH}_2-\text{ONO}_2$ ); 1070 (C–O–C); 1170...1120 (глюкопиранозное кольцо); 2925, 2850 (C–H); 3600...3200 ( $-\text{OH}$ ). Найдено, %: C 26,41; H 2,91; N 11,93. Вычислено, %: C 26,06; H 2,70; N 12,87.

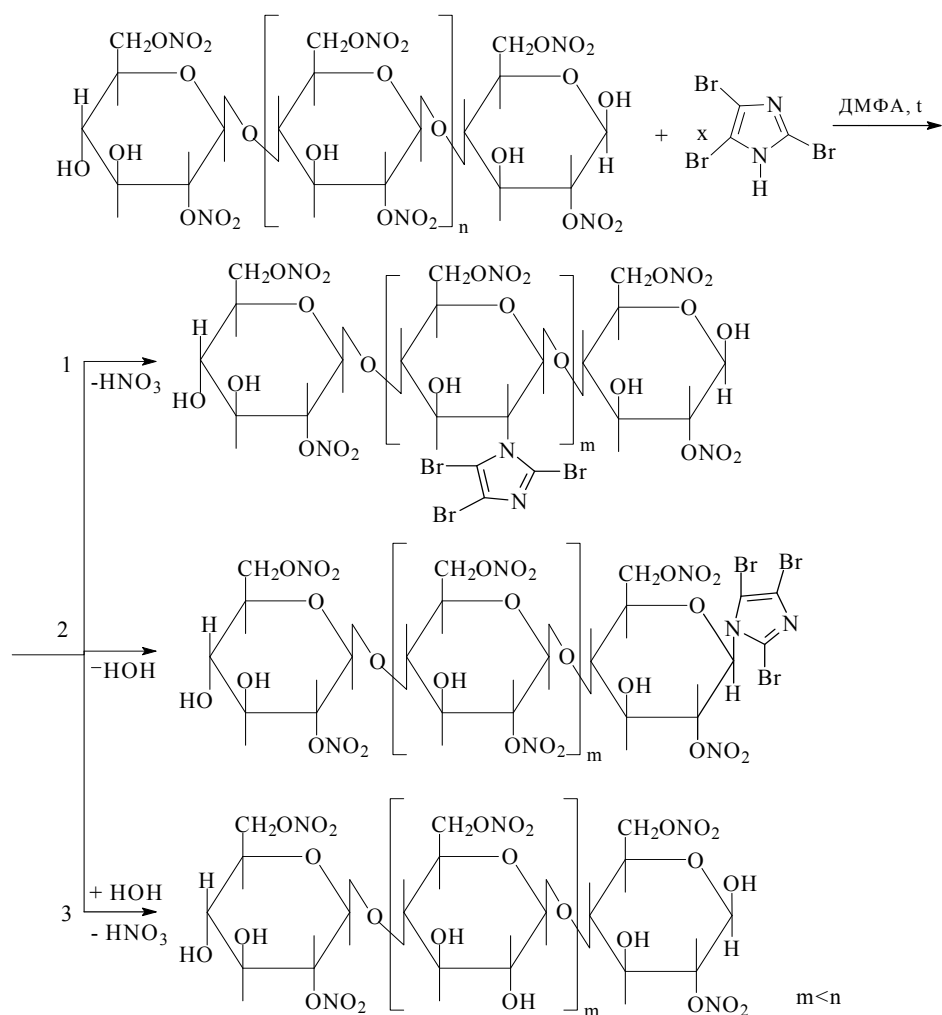
*Характеристики продуктов взаимодействия НЦ с 2,4,5-трибромимидазолом максимальным временем выдержки:*

1.  $\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{ONO}_2)_{2,12}(\text{OH})_{0,37}(\text{C}_3\text{Br}_3\text{N}_2)_{0,51}$  ( $t_{\text{реак}} = 60$  °С;  $\tau = 5$  ч): выход 63,4%.  $t_{\text{разл}}$  205...210 °С. Характеристическая вязкость ( $\eta$ ) 1,64. ИК-спектр,  $\nu$ ,  $\text{см}^{-1}$ : 680...515

(валентные колебания C–Br), 700...690, 840, 1280, 1380, 1670...1650 (–ONO<sub>2</sub>, –CH<sub>2</sub>–ONO<sub>2</sub>), 1140–1070 (C–O–C), 1250–1180 (C–N), 1170–1120 (колебания глюкопиранозного кольца), 1660...1480 (C=N в цикле), 2925 (C–H), 3544...3502 (–O–H). Найдено, %: С 23,16; Н 2,15; N 10,29; Br 31,05. Вычислено, %: С 22,38; Н 1,83; N 10,89; Br 30,31.

2. C<sub>6</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>(ONO<sub>2</sub>)<sub>1,70</sub>(OH)<sub>0,35</sub>(C<sub>3</sub>Br<sub>3</sub>N<sub>2</sub>)<sub>0,95</sub> (*t*<sub>пек</sub> = 80 °С; τ = 5 ч): выход 57,6%. *t*<sub>разл</sub> 205...210 °С. Характеристическая вязкость (η) 0,68. ИК-спектр, ν см<sup>–1</sup>: 515...680 (валентные колебания C–Br), 700...690, 840, 1280, 1380, 1670...1650 (–ONO<sub>2</sub>, –CH<sub>2</sub>–ONO<sub>2</sub>), 1140...1070 (C–O–C), 1250...1180 (C–N), 1170...1120 (колебания глюкопиранозного кольца), 1660...1480 (C=N в цикле), 2925 (C–H), 3544...3502 (–O–H). Найдено, %: С 19,94; Н 1,07; N 10,12; Br 43,11. Вычислено, %: С 20,78; Н 1,44; N 9,86; Br 44,6.

На основании данных физико-химических методов анализа была предложена общая, вероятная схема направлений химического превращения НЦ, представленная на рис. 1.



**Рис. 1. Схема одновременно протекающих направлений химического взаимодействия НЦ с 2,4,5-трибромимидазолом:**

- 1 – нуклеофильное замещение нитратных групп на радикал –C<sub>3</sub>N<sub>2</sub>Br<sub>3</sub>;
- 2 – разрыв β-гликозидной связи с присоединением по концу полимерной цепи 2,4,5-трибромимидазольного кольца; 3 – гидролиз нитратных групп и деполимеризация цепи макромолекул полимера

Полученные в ходе работы данные свидетельствуют о том, что при 60–80 °С в среде диметилформамида между высокоазотным НЦ и 2,4,5-трибромимидазолом протекает химическая реакция, которая характеризуется рядом процессов, представленных на схеме (рис. 1).

Применение данного метода утилизации устаревших пироксилиновых порохов могло бы стать альтернативой существующим способам. Экологическая целесообразность заключается в том, что, во-первых, будет исключено загрязнение атмосферы продуктами горения и взрыва, а во-вторых, прекратятся потери ценного компонента порохов, который послужит субстратом для производства новых товаров.

#### *Список использованных источников*

1. Шукин, Ю. Г. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов : учеб. пособие для вузов / Ю. Г. Шукин, Б. Н. Кутузов, Б. В. Матеевич, Ю. А. Татищев ; под общей ред. Ю. Г. Шукина. – М. : Недра, 1998. – 319 с.
2. Сарыбаева, Р. И. Химия азотнокислых эфиров целлюлозы / Р. И. Сарыбаева, Л. С. Щелохова. – Фрунзе : Илим, 1985. – С. 164.
3. Романова, С. М. Реакции нитратов целлюлозы с гетероциклическими соединениями / С. М. Романова, Д. И. Павлова, А. М. Мадякина, М. В. Хузеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. – 2015. – Т. 8, № 3. – С. 336 – 345.
4. Романова, С. М. Исследование реакции взаимодействия нитратов целлюлозы с несимметричным диметилгидразином / С. М. Романова, С. В. Фридланд, Е. И. Уткина // Вестник Татарского отделения Российской Экологической Академии. – 2006. – № 4. – С. 46 – 51.
5. Роговин, З. А. Химические превращения и модификация целлюлозы / З. А. Роговин, Л. С. Гальбрайт. – М. : Химия, 1979. – 208 с.
6. Романова, С. М. Исследование реакции взаимодействия азотнокислых эфиров с ангидридами карбоновых кислот / С. М. Романова, С. В. Фридланд – Вестник Казанского технологического университета, 2010. – № 7. – С. 79–86.
7. Бабкина, С. С. Адсорбция ионов свинца (II) и кадмия (II) на поверхности нитроцеллюлозной мембраны, модифицированной денатурированной дезоксирибонуклеиновой кислотой / С. С. Бабкина, Н. А. Улахович, Ю. И. Зявкина, Е. Н. Моисеева // Журнал физической химии. – 2003. – Т. 77, № 5. – С. 890–894.
8. Александрова, Е. В. Свойства галогенимидазолов / Е. В. Александрова, А. Н. Кравченко, П. М. Кочергин // Химия гетероциклических соединений – 2011. – № 3. – С. 323 – 356.

#### *References*

1. Shchukin, Yu. G. Industrial explosives based on utilized ammunition: textbook for high schools / Yu. G. Shchukin, B. N. Kutuzov, B. V. Matseevich, Yu. A. Tatishchev ; under the General editorship of Yu. G. Shchukin. – M. : Nedra, 1998. – 319 p.
2. Sarybaeva, R. I. Chemistry of nitrate ethers of cellulose / Sarybaeva R. I., L. S. Schelohova. – Frunze : Ilim, 1985. – 164 p.

3. Romanova, S. M. Reaction of cellulose nitrates with heterocyclic compounds / S. M. Romanova, D. I. Pavlova, A. M. Madykina, M. V. Guzeev // Journal of Siberian Federal University. Series: Chemistry. – 2015. – V. 8, N. 3. – P. 336 – 345.
4. Romanova, S. M. Study of the reaction of cellulose nitrate with asymmetric dimethylhydrazine / S. M. Romanova, S. V. Fridland, E. I. Utkina // Vestnik the Tatar branch of the Russian Ecological Academy. – 2006. – N 4. – P. 46 – 51.
5. Rogovin, Z. A. Chemical conversion and modification of cellulose / Z. A. Rogovin, L. S. Galbraikh. – M. : Chemistry, 1979. – 208 p.
6. Romanova, S. M. Study of the reaction of nitrate esters with anhydrides of carboxylic acids / S. M. Romanova, S. V. Fridland // Herald of the Kazan. tekhnol. University press. – 2010. – N 7. – P. 79 – 86.
7. Babkina, S. S. Adsorption of lead ions (II) and cadmium (II) on the surface of the nitrocellulose membrane modified by the denatured deoxyribonucleic acid / S. S. Babkina, N. A. Ulakhovich, Yu. I. Zyavkina, E. N. Moses // Journal of physical chemistry. – 2003. – V. 77, N 5. – P. 890 – 894.
8. Alexandrov, E. V. Properties of galogenimidazols / E. V. Aleksandrova, A. N. Kravchenko, P. M. Kochergin // Chemistry of heterocyclic compounds. – 2011. – N 3. – P. 323 – 356.

**Бабкин В. Ф., Евсеев Е. П., Захаров П. Д.**  
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
(Россия, г. Воронеж)

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

**Babkin V. F., Evseev E. P., Zakharov P. D.**  
Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering  
(Russia, Voronezh)

## **ENERGY-SAVING WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGIES**

*Аннотация.* В данной работе рассмотрены основные проблемы очистки производственных сточных вод от нерастворимых (жировых и белковых) загрязняющих веществ, обработки и утилизации осадков сточных вод органического происхождения. Предлагается эффективный способ очистки сточных вод от нерастворимых (жировых и белковых) загрязняющих веществ – метод электрофлотации. Рассмотрены преимущества электрофлотационного оборудования по сравнению аналогами. Определена энергетическая ценность осадков сточных вод органического происхождения – фузы. Предложен метод обработки фузы и использования ее в качестве вторичного сырьевого ресурса для создания возобновляемого источника энергии – твердого биотоплива.

*Ключевые слова:* электрофлотация, утилизация органических отходов, возобновляемые источники энергии.

*Abstract.* In this paper, the basic problems of clearing of industrial sewage from the insoluble (protein and fat) of contaminants treatment and disposal of sewage sludge of organic origin. We propose an efficient method of waste water purification from insoluble (fat and protein) of pollutants – a method of electro-flotation. Advantages of flotation equipment in comparison with analogues. Determined the energy value of sludge organic – oil sludge deposits. The method of processing oil sludge deposits and the use as secondary raw material resource for the creation of a renewable energy source is solid biofuels.

*Keywords:* electroflotation, recycling organic waste, renewable sources of energy.

В последние годы в связи с высоким темпом развития промышленности и увеличением производственных мощностей пищевых, нефтехимических, сельскохозяйственных, металлургических и др. комплексов, актуальными являются работы по очистке производственных сточных вод. Также одним из главных экологических приоритетов является утилизация осадков сточных вод и рациональное их использование.

Известно много способов защиты от техногенного воздействия отходов промышленных предприятий на окружающую среду. К ним относятся энергосберегающие технологии физико-химической очистки производственных сточных вод и утилизации органических отходов, образующихся в процессе очистки.

К перспективным флотационным методам можно отнести компрессионную (напорную) флотацию и электрофлотацию. Различие между этими видами флотации заключается прежде всего в разной дисперсности газовой фазы. Электрофлотация, при которой дисперсность газовой фазы на порядок меньше, чем при напорной флотации является более эффективным методом очистки производственных сточных вод, содержащих мелкодисперсные загрязнения.

При этом способе сточная жидкость, при пропускании через нее постоянного электрического тока, насыщается пузырьками газа (водорода), образующегося на одном из электродов (катоде). Прохождение электрического тока через сточную жидкость, являющуюся зачастую многокомпонентным раствором-электролитом, изменяет химический состав жидкости, свойства и состояние нерастворенных примесей. В одних случаях эти изменения положительно влияют на процесс очистки, в других – ими надо управлять, стремясь к достижению наибольшего эффекта очистки вообще или от определенного компонента [1].

В процессе электрофлотации в качестве флотирующего реагента используется электролитический водород. Нерастворимые загрязняющие вещества, переносимые микропузырьками электролитических газов, поднимаются на поверхность сточной воды и образуют пену – флотоконцентрат.

Эффективность флотационного процесса определяется размерами пузырька водорода. Чем меньше диаметр газового пузырька, тем меньшая по геометрическим размерам частица будет извлекаться из глубины раствора на поверхность.

В работе [2] авторами были проведено исследование процесса флотирования газовой фазы в процессе электролиза. Было установлено, можно заключить, что число центров нуклеации пропорционально плотности тока. Именно по этой причине для увеличения степени дисперсности водорода следует максимально повышать катодную плотность тока.

Для предотвращения зарастания электродов необходимо использовать реверсивный режим работы электролизной ячейки.

ООО «МЕЛН» совместно с Воронежским ГАСУ [3] на ряде действующих электрофлотационных установок произвели замеры потребляемой электроэнергии и установили:

1. Удельный расход энергии компрессионной флотации составляет около 0,8 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> стоков;
2. На электрофлотатор «ЭФ-3», установленный в ОАО «Воронежсинтезкаучук», подается 720 Вт при расходе стока 8 м<sup>3</sup>/ч, т.е. удельный расход электроэнергии составляет 0,09 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> стоков;
3. Электрофлотатор «ЭФ-3» для очистки ливневых стоков в ОАО «Лискимонтаж-конструкция» при расходе стока 25 м<sup>3</sup>/ч потребляет 0,125 кВт·ч на 1 м<sup>3</sup> стоков.

Электрофлотация представляет собой высокоэффективные системы очистки сточных вод с малыми удельными энергозатратами и высокой производительностью. Средняя энергозатратность на 1 м<sup>3</sup> очищенной воды лежит в пределах 80...125 Вт.

В работе [3] так же проведены испытания электрофлотационного метода очистки горячих стоков от нефтепродуктов (мазута) на Воронежской ТЭЦ-2. Установлено, что

при 85 °С остаточная концентрация нефтепродуктов с использованием имеющихся на ТЭЦ-2 коагулянтов составила 0,05 мг/л при исходной концентрации 40 мг/л. Экономия энергии при этом составляет 0,07 Гкал на 1 м<sup>3</sup> стока.

При очистке стоков молочного завода наблюдалось уменьшение Коли-индекса на 7 порядков. Более детальное исследование эффекта обеззараживания было проведено ООО «МЕЛН» совместно с ФГУ «Центр Госсанэпиднадзора в Воронежской области» и Воронежским ГАСУ [3]. На чистых культурах было показано, что эффективно обеззараживается водная среда от сальмонелл, стафилококка, цист лямблий, грибов рода кандида, бактерий группы кишечной палочки. Обеззараживание было выполнено при электролизе водной фазы без внесения хлорсодержащих веществ в сток. Поэтому использование электрофлотационной технологии очистки сточных вод позволяет отказаться от применения хлораторных на предприятиях пищевой отрасли, где необходимо проводить обеззараживание сточных вод, что является неоспоримым преимуществом данного метода очистки сточных вод.

Электрофлотационный метод позволяет очищать производственные сточные воды до норм сброса в хозяйственно-бытовую канализацию или использования на технические нужды предприятия.

Основные отходы электрофлотационной очистки сточных вод – это флотоконцентрат (фуза). Являясь отходом органического происхождения, фуза обладает двумя важнейшими особенностями [4]:

1. Она содержит запасы энергии;
2. Она является возобновляемым источником энергии.

Энергетическая ценности таких отходов основывается анализе удельной теплотворной способности топливных брикетов, полученных из древесных опилок с добавлением в опилки отходов очистных сооружений двух видов:

1. Отходы с локальных очистных сооружений мясокомбината – жиросодержащая фуза;
2. Отходы с иловых карт биологических очистных сооружений того же мясокомбината.

Использование в качестве добавки к опилкам отходов очистных сооружений увеличивает удельную теплотворную способность топливных брикетов. Интересным, но вполне объяснимым оказалось следующее: отношение удельной теплотворной способности топливных брикетов с различным содержанием фузы к удельной теплотворной способности топливных брикетов, полученных из чистых опилок с точностью до третьего знака совпадало с результатами модельного эксперимента, сущность которого в следующем: рассчитывалось отношение удельной теплотворной способности двухкомпонентной смеси дерево и нефть с тем же соотношением нефти к дереву, что и в реальном эксперименте фуза к опилкам, к удельной теплотворной способности дерева.

Следует так же отметить преимущество топливных брикетов из древесных опилок с добавлением фузы по сравнению со стандартными топливными брикетами из древесных опилок по влагуустойчивости и длительности срока хранения без саморазрушения. Образцы топливных брикетов обоих видов хранились на складе в одном не отапливаемом

мом помещении на протяжении двух лет. В результате было замечено: в отличие от брикетов из чистых опилок, изменивших свои механические свойства (и теплотворные параметры), ввиду гигроскопичности опилок, брикеты с добавлением жировой фазы сохранились в первозданном виде.

Основным элементом, преобразующим энергию, является газификатор (или газогенератор), в котором производится генерация топлива, сформованного из продуктов очистки сточных вод и твердых илов, а также органических наполнителей, представляющих собой отходы деревоперерабатывающей промышленности (стружки, опилки) и отходов сельскохозяйственного производства (подсолнечная лузга, стебли подсолнечника, подстилочная масса и др.).

В зоне генерации топлива происходит образование основных компонентов горючего газа. Это позволяет использовать тепловую энергию по принципу работы электростанций (преобразование тепловой энергии в механическую и далее преобразование механической энергии в электрическую).

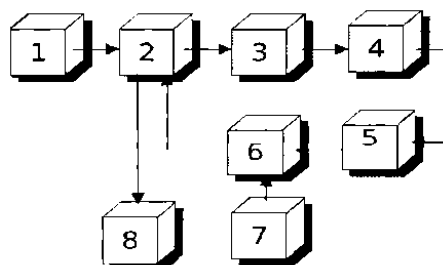
Для создания надежной системы регулирования выходных параметров тепловой и электрической машин, нами предложена универсальная система регулирования, позволяющая осуществить адекватную реакцию электрического генератора на изменение выходной мощности теплового генератора. В качестве такой системы нами предлагается использовать электрохимические преобразователи энергии в роли регуляторов электрической нагрузки.

Функциональная схема такой системы представлена на рис. 1.

Избыток электрической мощности в этом случае затрачивается на производство водорода и кислорода, используемого для технологических нужд (система дожига топлива в газогенераторе).

Системы такого типа позволяют их использовать в непрерывном режиме, постоянно поддерживая систему тепловой генератор/электрогенератор в режиме автоматического регулирования [5].

Разработанная система очистки производственных сточных вод и утилизации осадков позволяет экологизировать и экономизировать процесс очистки, а также удовлетворить собственные энергетические потребности.



**Рис. 1. Функциональная схема регулирования соотношения тепловой и электрической нагрузок:**

1 – источник энергии; 2 – коммутатор-распределитель; 3 – электрохимический генератор;  
4 – накопитель водорода (топлива); 5 – топливный элемент (ПГУ); 6 – преобразователь энергии;  
7 – система управления; 8 – потребитель электрической энергии

#### *Список использованных источников*

1. Манцев, А. И. Очистка сточных вод флотацией. – Киев : «Будивельник», 1976. – 132 с.
2. Шалимов, Ю. Н. Повышение степени очистки воды методом водородной флотации / Ю. Н. Шалимов, В. Ф. Бабкин, Е. П. Евсеев, П. Д. Захаров, В. Э. Ненно, М. Лутовац, С. А. Соколов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – Т. 1. – С. 121 – 124.
3. Бабкин, В. Ф. Анализ методов локальной очистки сточных вод / В. Ф. Бабкин, Н. Н. Злобина, Е. П. Евсеев, В. Э. Ненно, Г. С. Сейдалиев, В. И. Ступин, М. И. Чубирко // Экология производства. – 2010. – № 10. – С. 73 – 77.
4. Бабкин, В. Ф. Утилизация органических отходов в энергосберегающих технологиях / В. Ф. Бабкин, Е. П. Евсеев, П. Д. Захаров, Ю. Н. Шалимов, В. Н. Яценко, И. Н. Трофимец // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 2(142). – С. 117 – 122.
5. Трофимец, И. Н. Новые энергоустановки на базе критических установок / И. Н. Трофимец, Е. П. Евсеев, В. Ф. Бабкин, А. Л. Гусев, Ю. Н. Шалимов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – N 16(156). – С. 86 – 91.

#### *References*

1. Mantsev, A. I. Sewage treatment by flotation. – Kiev : “Budivelnik”, 1976. – 132 p.
2. Shalimov, Yu. N. Increase of extent of water purification by method of hydrogen flotation / Yu. N. Shalimov, V. F. Babkin, E. P. Evseev, P. D. Zakharov, V. E. Nenno, M. Lutovats, S. A. Sokolov//safety Problems at mitigation of consequences of emergency situations. – 2015. – V. 1. – P. 121 – 124.
3. Babkin, V. F. Analysis of methods of local sewage treatment / V. F. Babkin, N. N. Zlobina, E. P. Evseev, V. E. Nenno, G. S. Seydaliyev, V. I. Stupin, M. I. Chubirko // Production Ecology. – 2010. – N 10. – P. 73 – 77.
4. Babkin, V. F. Utilization of organic waste in energy saving technologies / V. F. Babkin, E. P. Evseev, P. D. Zakharov, Yu. N. Shalimov, V. N. Yatsenko, I. N. Trofimets // Alternative power engineering and ecology. – 2014. – N 2(142). – P. 117 – 122.
5. Trofimets, I. N. New power stations on the basis of critical installations / I. N. Trofimets, E. P. Evseev, V. F. Babkin, A. L. Gusev, Yu. N. Shalimov // Alternative power engineering and ecology. – 2014. – N 16(156). – P. 86 – 91.

**Абоносимов Д. О., Лазарев С. И.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНОПРОИЗВОДСТВ**

**Abonosimov D. O., Lazarev S. I.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **ELECTROBAROMEMBRANE TECHNOLOGIES ARE ENERGY SAVING IN WASTEWATER TREATMENT OF GALVANOPLASTICS**

*Аннотация.* Рассмотрены проблемы очистки сточных вод и обосновано преимущество применения мембранных методов. Рассмотрены основные кинетические параметры процесса баромембранного разделения растворов, а также проанализировано их влияние на процесс разделения растворов. Представлена перспектива развития электробаромембранных методов разделения растворов.

*Ключевые слова:* мембрана, баромембранные процессы, разделение, раствор, установка.

*Abstract.* Examines the problems of sewage treatment and substantiated the advantage of using membrane methods. Describes the main kinetic parameters of baromembrane process of separation of solutions and analyze their impact on the process of separation of solutions. Are the future development electrobaromembrane methods of separation of solutions.

*Keywords:* membrane, baromembrane processes, separation, solution, setting.

Актуальность вопросов очистки сточных вод предприятий химической промышленности, сельского хозяйства, а также усиление контроля за состоянием водных экосистем в рамках «Водной стратегии Российской Федерации» до 2020 г., способствовали появлению на рынке локальных очистных сооружений канализации огромного количества всевозможных комплексов для очистки сточных вод.

В течение последних лет наблюдается постоянный рост беспокойства по поводу загрязнения тяжелыми металлами нашего водоснабжения. Такие элементы, как медь, серебро, хром, свинец и цинк обладают токсичностью по отношению к человеку. Основным поставщиком этих элементов является гальваническое производство.

Несмотря на различия технологий, и вариантов комплектации оборудованием локальных очистных сооружений, принципиально выбор осуществляется между классической технологией очистки, применяемой на большинстве отечественных городских очистных сооружений, и технологией очистки с разделением иловой смеси на мембранах. Выбор не является однозначным, и определяется целым рядом особенностей реконструируемого или строящегося объекта очистки сточных вод.

К сожалению, недостаточное количество реализованных в России проектов очистных сооружений с применением мембранных технологий и информационные материа-

лы, базирующиеся на устаревших данных о высокой стоимости и трудоемкости эксплуатации таких очистных сооружений, тормозят широкое распространение мембранных технологий в России. В результате эксплуатирующие предприятия часто делают бессознательный выбор в пользу классической технологии очистки сточных вод, игнорируя возможности технологии мембранного разделения.

Классическая технология, применяемая на большинстве отечественных городских очистных сооружений, предусматривает механическую очистку на решетках и в песколовках, первичное отстаивание, биологическую очистку в аэротенках микроорганизмами активного ила с последующим разделением иловой смеси отстаиванием, доочистку и обеззараживание.

В отличие от классических методов очистки, мембранные технологии обладают компактностью оборудования; простотой наращивания мощностей ввиду модульной конструкции оборудования; надежной барьерной фильтрацией; сравнительно низким энергопотреблением; возможностью получения качественной фильтрации на одном шаге обработки воды; минимальным применением химикатов; возможностью автоматизировать процессы обработки и контроля качества воды.

Затраты на обработку 1 м<sup>3</sup> воды методами мембранной технологии, по сравнению с классическими методами значительно снижаются. Если десять лет назад они были в несколько раз больше, то на сегодняшний день не только сравнялись, но и стали меньше. Автоматизация основных технологических процессов существенно упрощает эксплуатацию очистных сооружений (в Европе очистные сооружения до 5000 м<sup>3</sup> в сутки обслуживает один оператор). Основным ограничением применения мембранных технологий являются несколько более высокие эксплуатационные затраты.

Среди мембранных методов очистки широкое распространение нашли баромембранные процессы, где движущей силой процесса является градиент давления. К таким процессам относятся обратный осмос, микрофильтрация и ультрафильтрация [1 – 3].

Наиболее значимыми кинетическими характеристиками, которые определяют скорость массопереноса в баромембранных процессах, являются удельная производительность и коэффициент задержания.

Удельная производительность мембран оценивается объемом жидкости, прошедшей через единицу поверхности мембраны за единицу времени при единичном перепаде давления.

На величину удельной производительности при разделении растворов оказывает влияние давление, под которым находится разделяемый раствор, температура раствора, концентрация растворенных веществ в растворе, а также природа растворенного вещества. С увеличением давления удельная производительность через полупроницаемые мембраны повышается [1, 2]. Температура также оказывает влияние, в рабочем диапазоне температур удельная производительность с ростом температуры разделяемого раствора повышается, дальнейший рост температуры ведет к резкому ее снижению.

Значительное влияние на удельную производительность мембран оказывает концентрация растворенного вещества. С увеличением концентрации удельная производительность снижается [2].

Существенным параметром процесса обратноосмотического разделения является коэффициент задержания, зависящий от ряда факторов: тип системы «мембрана – раствор», давление, температура, концентрация и гидродинамика процесса [1 – 3].

В данной статье приведены результаты исследования обратноосмотического разделения растворов меди и тринатрий фосфата различных концентраций при рабочих давлениях (ОПМН-П – 2,0 МПа, МГА-95П – 4,0 МПа).

Исследования коэффициента задержания и удельной производительности через мембраны осуществлялись на экспериментальной установке, представленной в работе [4].

Рабочими элементами ячейки служат мембраны МГА-95П и ОПМН-П производства ОАО «Владипор» г. Владимир. Площадь мембраны составляет  $F = 0,0078 \text{ м}^2$ .

Экспериментальное значение коэффициента задержания определяли по формуле:

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

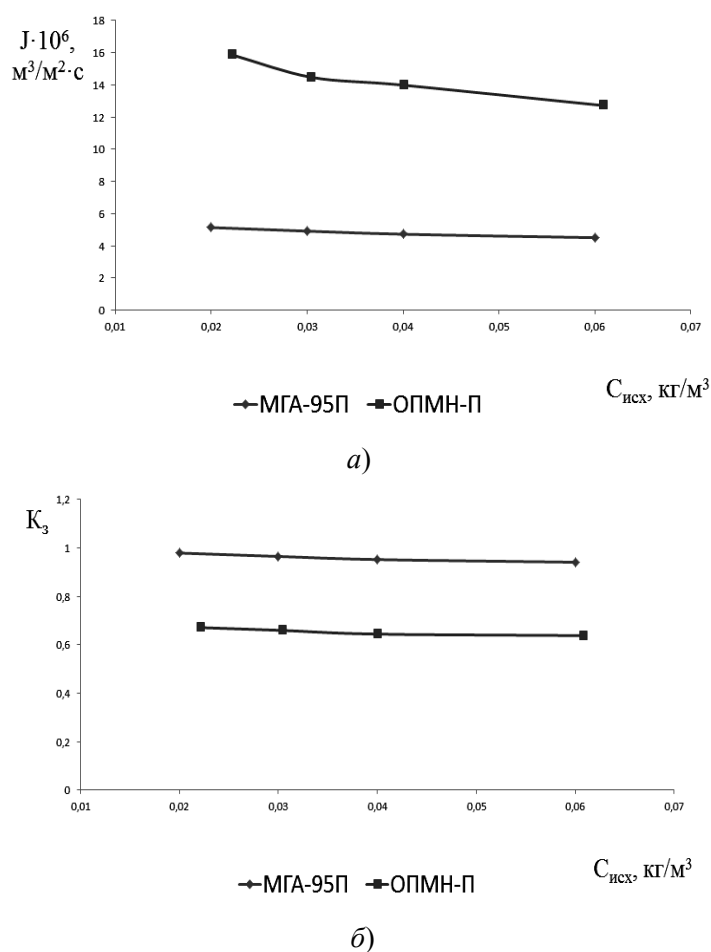
где  $K$  – коэффициент задержания;  $C_{\text{пер}}$  – концентрация растворенного вещества в пермеате;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация растворенного вещества в исходном растворе.

Значение удельной производительности рассчитывали по следующей зависимости [2]:

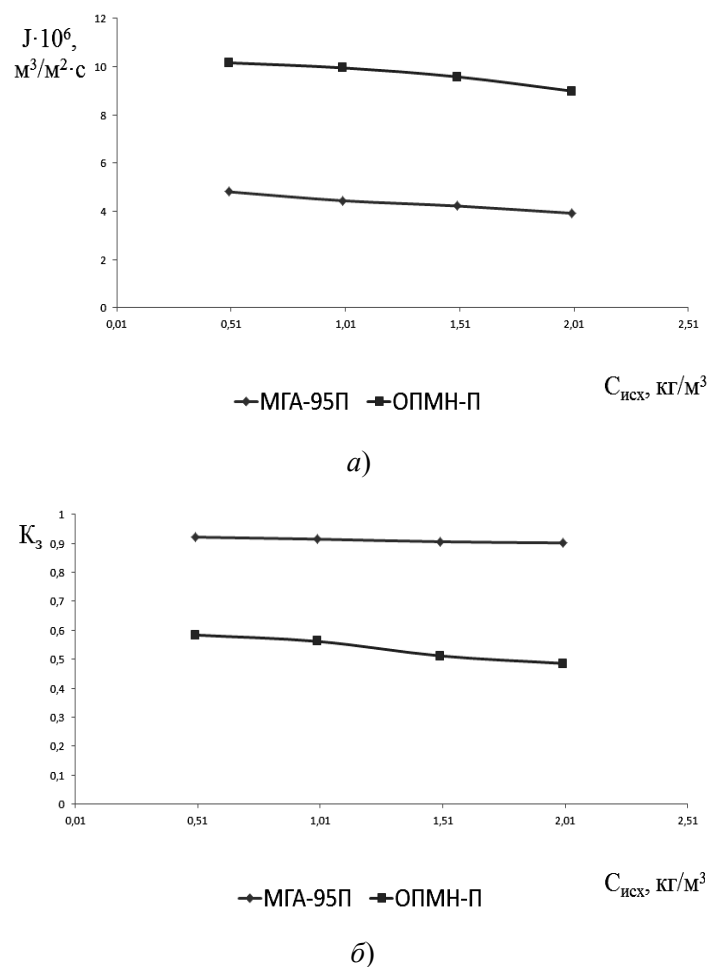
$$J = \frac{V}{F\tau}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем собранного пермеата;  $F$  – площадь поверхности мембраны;  $\tau$  – время проведения эксперимента.

На рисунке 1 представлены зависимости удельной производительности и коэффициента задержания мембран от концентрации меди в исходном растворе.



**Рис. 1. Зависимость удельной производительности (а) и коэффициента задержания (б) мембран от концентрации меди в исходном растворе**



**Рис. 2. Зависимость удельной производительности (а) и коэффициента задержания (б) мембран от концентрации тринатрийфосфата в исходном растворе**

На рисунке 2 представлены зависимости удельной производительности и коэффициента задержания мембран от концентрации тринатрийфосфата в исходном растворе.

Как видно из приведенных графиков, удельная производительность мембран существенно зависит от их вида, а также от концентрации растворенного вещества в исходном растворе. Удельная производительность мембраны ОПМН-П существенно выше по сравнению с мембраной МГА-95П. С увеличением концентраций вышеприведенных веществ в исходных растворах производительность мембран снижается, что связано с уменьшением движущей силы процесса, снижением доли воды в пограничных и рабочих слоях мембран, а также с различным видом взаимодействия растворенного вещества с активным слоем мембраны и различиями в пористой структуре активного слоя мембран. Коэффициент задержания, как видно из приведенных данных с увеличением концентрации изменяется незначительно[3].

В результате изучения влияния различных полей на процессы ультраfiltrации и обратного осмоса предложены и разработаны новые методы разделения водных растворов гальванопроизводств такие как электроультраfiltrация и электроосмоfiltrация, которые происходят при одновременном воздействии градиентов давления и электрического потенциала.

Электробаромембранная технология – новое, активно развивающееся направление химической промышленности, находящееся в начале пути своего становления. Главные преимущества электробаромембранной технологии заключаются в экологичности, безреагентности, малой металло- и энергоемкости, простоте конструктивного оформления и возможности концентрирования и выделения из растворов веществ, особенно тяжелых металлов. Тем не менее, применение электробаромембранных методов при очистке гальваностокос сдерживается малоизученностью кинетики процесса массопереноса, его математического описания, отсутствием аппаратов для реализации этих методов.

#### *Список использованной литературы*

1. Дытнерский, Ю. И. Баромембранные процессы. – М. : Химия, 1986. – 272 с.
2. Мулдер, М. Введение в мембранную технологию / под ред. Ю. П. Ямпольского, В. П. Дубяги. – М. : Мир, 1999. – 513 с.
3. Шапошник, В. А. Мембранные методы разделения смесей веществ // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 9. – С. 27 – 32.
4. Лазарев, С. И. Разработка виртуального тренажера экспериментального исследования обратноосмотического разделения промышленных сточных вод / С. И. Лазарев, Д. О. Абоносимов, А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2015. – № 2. – С. 178 – 183.

#### *References*

1. Dynarski, Yu. I. Baromembrane processes. – M. : Chemistry, 1986. – 272.
2. Mulder M. Introduction to membrane technology / edited by Yu. P. Yampolsky, V. P. Dub'yahy. – M. : Mir, 1999. – 513 p.
3. Shaposhnik, V. A., Membrane methods of separation of mixtures of substances // Soros. obrazovat. Sib. – 1999. – N 9. – P. 27 – 32.
4. Lazarev, S. I. Development of a virtual simulator of an experimental study of reverse osmosis separation of industrial wastewater / S. I. Lazarev, D. O. Abonosimov, A. M. Akulinchev, O. A. Abrosimov // Questions of modern science and practice. University V. I. Vernadsky. – 2015. – N 2. – P. 178 – 183.

УДК 667  
ББК 35.745

**Алексеева Н. В., Бахтурина И. А.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **УМЕНЬШЕНИЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПИГМЕНТОВ**

**Alekseeva N. V., Bahturina I. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **REDUCTION OF WATER CONSUMPTION IN PRODUCTION OF PIGMENTS**

*Аннотация.* Рассмотрена основная задача сокращения водопотребления воды при производстве пигментов. Приведены составы промывных вод и требования к исходной воде. Предложен метод решения поставленной задачи.

*Ключевые слова:* пигменты, промывные воды, сточные воды, водопотребление.

*Abstract.* The main problem of reduction of water consumption in production of pigments is considered. Compositions of washing waters and the requirement to initial water are given. The method of the solution of the put problem is offered.

*Keywords:* pigments, washing waters, sewage, water consumption.

Пигменты – органические или неорганические вещества, применяемые для окрашивания различных материалов: от цветных карандашей до строительных материалов. Современная химическая промышленность производит богатую палитру пигментов, которые выпускаются как в виде сухого порошка, так и в виде пасты. Готовой продукцией химических заводов являются сухие пигменты, красители и лаки.

Процесс производства пигментов является сложным и ресурсозатратным. Производство пигментов включает в себя следующие стадии:

- диазотирование;
- разбавление;
- сочетание;
- фильтрование и промывка.

На каждой из перечисленных стадий расходуется большое количество воды качества артезианской воды. Среднее значение количества потребляемой воды и образующихся сточных вод для производства 500 кг сухого пигмента приведено в табл. 1.

Анализируя весь технологический процесс, видно, что при получении пигмента образуется большое количество сточных вод на стадии промывки. На одну операцию фильтр-пресса тратится 20 м<sup>3</sup> воды на разбавление и 16 м<sup>3</sup> на промывку. В результате промывки образуется около 36 м<sup>3</sup> вод, требующих утилизации.

### 1. Водопотребление и образование сточных вод при производстве пигмента

| № п/п | Наименование стадии     | Количество потребляемой воды, м <sup>3</sup> | Количество сточных вод, м <sup>3</sup> |
|-------|-------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1     | Диазотирование          | 0,2                                          | 0,1                                    |
| 2     | Сочетание               | 0,1                                          | 0,1                                    |
| 3     | Разбавление             | 20,0                                         | -                                      |
| 4     | Фильтрование и промывка | 16,0                                         | 36,0                                   |

Наилучшим решением поставленной задачи явилась бы очистка образовавшихся сточных вод и возврат очищенной воды обратно в производство, т.е. значительное уменьшение водопотребления при производстве. Основные компоненты, загрязняющие промывные воды, приведены в табл. 2.

Проектирование стадии очистки промывных вод предусматривает расчет обессоливающей установки, для которого необходимо знать требования, предъявляемые к исходной воде. Требования, предъявляемые к исходной воде, представлены в табл. 3.

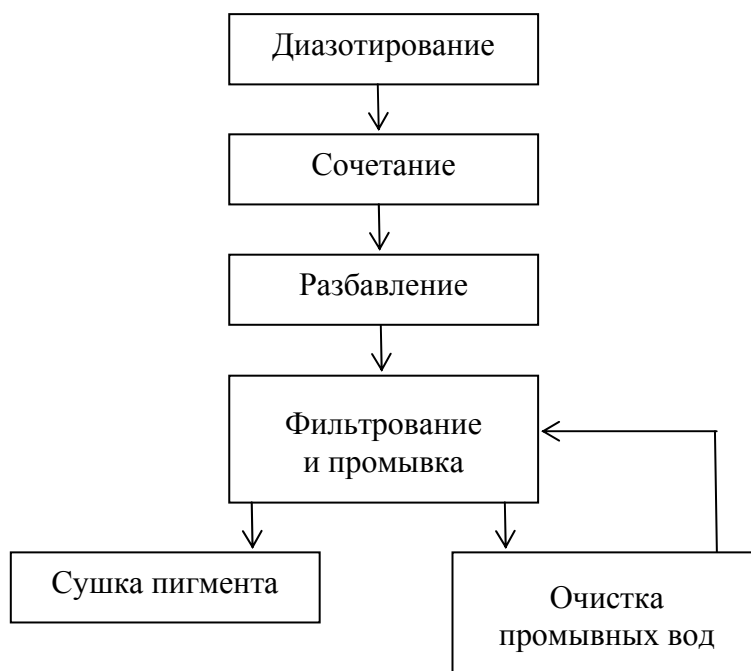
Проведя анализ загрязненных промывных вод и требований к исходной воде, следует вывод о необходимости полной очистки воды от взвешенных веществ и очистки от неорганических растворимых элементов до определенных значений.

### 2. Основные компоненты промывных вод

| № п/п | Характеристика        | Значение, мг/дм <sup>3</sup> |
|-------|-----------------------|------------------------------|
| 1     | Хлорид-ионы           | 7029                         |
| 2     | Магний                | 121,6                        |
| 3     | Кальций               | 100,2                        |
| 4     | Сульфат-ионы          | 76                           |
| 5     | Железо <sub>общ</sub> | 7,2                          |
| 6     | Взвешенные вещества   | 35                           |

### 3. Показатели качества исходной воды

| № п/п | Характеристика            | Значение |
|-------|---------------------------|----------|
| 1     | Хлориды, мг/л             | < 45     |
| 2     | Сульфаты, мг/л            | < 70     |
| 3     | ХПК, мг/л                 | < 15     |
| 4     | Железо, мг/л              | < 0,3    |
| 5     | Общ. жест, мг/л           | < 7,2    |
| 6     | Взвешенные вещества, мг/л | отс.     |



**Рис. 1. Усовершенствованная схема производства пигментов**

Удаление взвешенных частиц из водного раствора возможно путем ультрафильтрационного разделения, дальнейшее обессоливание раствора целесообразно проводить обратноосмотическим разделением. Таким образом, схема производства пигментов примет вид, представленный на рис. 1.

Внедрение предлагаемого усовершенствования позволит уменьшить потребление воды в производстве более чем на 50%.

#### *Список использованных источников*

1. ГОСТ 8567–73. Красители органические. Пигмент алый. Технические условия. – Введ. 30.06.1974. – М. : Госстандарт союза ССР: Изд-во стандартов, 1993. – 11 с.
2. ГОСТ 14842–78. Красители органические. Пигмент бордо. Технические условия. – Введ. 30.06.1979. – М. : Межгосударственный стандарт: Изд-во стандартов, 1999. – 7 с.
3. ГОСТ 30813–2002. Вода и водоподготовка. Термины и определения. – Введ. 01.01.2004. – М. : Межгосударственный стандарт: Изд-во стандартов, 2004. – 16 с.

#### *References*

1. State standard 8567–73. Dyes organic. The pigment is scarlet. Specifications. – 06.30.1974. – M. : Gosstandart of USSR: Publishing house of standards, 1993. – 11 p.
2. State standard 14842–78. Dyes organic. Bordeaux pigment. Specifications. – 06.30.1979. – M. : Interstate standard: Publishing house of standards, 1999. – 7 p.
3. State standard 30813–2002. Water and water treatment. Terms and definitions. – 01.01.2004. – M. : Interstate standard: Publishing house of standards, 2004. – 16 p.

**Банин Р. Ю., Черных Е. А., Ловягина Е. Ю.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ  
ПРИ СУШКЕ ЖИДКОЙ ПОСЛЕСПИРТОВОЙ БАРДЫ**

**Banin R. Yu., Black A. E., Lovyagina E. Yu.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**THE ISSUE OF REDUCING SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION  
DURING DRYING OF LIQUID DDGS**

*Аннотация.* Статья посвящена экологическим проблемам утилизации жидкой послеспиртовой барды, а также поиску оптимальной температуры сушки барды с целью энерго-и ресурсосбережения.

*Ключевые слова:* жидкая барда, сушка, кинетика.

*Abstract.* The article is devoted to ecological problems of disposal of liquid DDGS, as well as the search for the optimum temperature of drying of the stillage to energy and resource saving.

*Keywords:* liquid distillery stillage, drying, kinetics.

В настоящее время в России практически в каждом регионе и области существуют предприятия, на которых реализуется микробиологическое производство этилового спирта из зернового или другого сырья.

При этом в производстве этилового спирта образуется большое количество отходов: послеспиртовая барда – главный отход, побочные продукты перегонки этилового спирта (лютерная вода, сивушное масло, головная фракция этилового спирта), газы брожения. Они могут загрязнять окружающую среду, а в современных технологиях могут использоваться в качестве сырья для различных производств или утилизироваться различными способами.

Барда послеспиртовая – это продукт переработки отхода спиртового производства, жидкость (суспензия) светло-коричневого цвета с приятным запахом зерна. С одной стороны, барда — это отходы, вызывающие загрязнение окружающей среды. Поэтому запрещается сбрасывать барду в водоемы или в канализацию без предварительной переработки.

Одним из перспективных направлений по утилизации жидкой послеспиртовой барды является применение высокоинтенсивных процессов сушки непосредственно исходной барды в сушильных установках комбинированного типа.

Для разработки таких установок необходимо проведение исследований по кинетике сушки жидкой послеспиртовой барды в условиях, схожих с условиями сушки в реальных аппаратах.

Для России утилизация послеспиртовой барды всегда была актуальной проблемой. По экспертным оценкам, в настоящее время в России годовой объем производимой барды составляет примерно 700 млн. дал, причем из них перерабатывается не более 5%. Невостребованную барду большинство предприятий стараются слить в близлежащие водоемы либо на поля, что серьезно ухудшает экологическую ситуацию вокруг спиртовых заводов. Проблема усложняется тем, что барда – это скоропортящаяся жидкость, которая заражается посторонней микрофлорой в течение нескольких часов.

Линия утилизации послеспиртовой барды является наиболее энергонагруженной линией и фактически лимитирует производительность и энергопотребление всего спиртового завода.

Одним из главных направлений разработки схем безотходного производства этилового спирта, должно стать оборудование для утилизации барды, поэтому главным направлением наших исследований являлось проведение физического анализа сушки жидкой барды, с целью выработки рекомендаций по функционированию существующего технологического оборудования и возможного применение новых конструкций

Таким образом, для получения качественного готового продукта, необходим расчет и проектирование сушильного аппарата, работающего, как правило, только на исследованном продукте. Поэтому задача исследования кинетики сушки жидких продуктов, выявление механизма процесса сушки, получение специальных и обобщенных зависимостей, объяснение специфических явлений при сушке жидких продуктов является весьма актуальной как в научном плане, так и в практическом отношении.

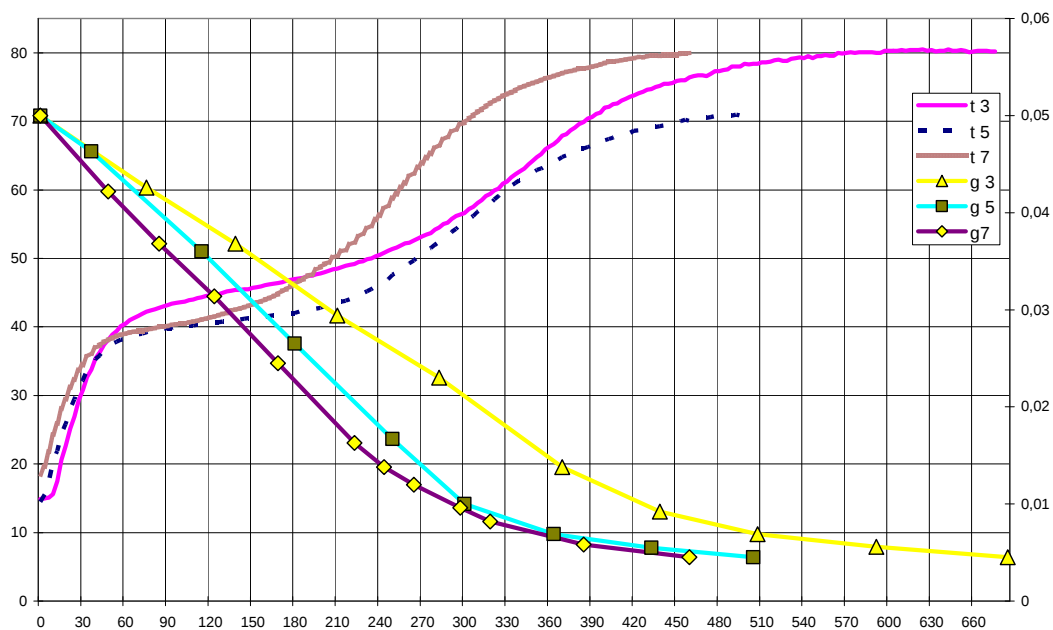
Нами были проведены исследования кинетики сушки капель жидкой послеспиртовой барды, нанесенных на твердую горизонтальную диффузионно-непроницаемую подложку.

Анализ термограмм и кривых сушки при постоянной температуре сушильного агента и варьируемой скорости сушильного агента показывает (рис. 1), что при заданной температуре влияние скорости сушильного агента на скорость сушки и время сушки незначительно. Исключение составляют так называемые «жесткие» режимы сушки при температуре сушильного агента более 160 °С. При этих режимах увеличение скорости сушильного агента резко увеличивает скорость сушки и сокращает время сушки.

Вероятнее всего это связано с ускорением формирования корки на поверхности сохнущей капли и увеличением давления внутри мелких пузырей испаряющихся при температуре более 100 °С, что приводит к облегчению разрушения сформировавшейся корки. Однако, следует отметить, что такие режимы сушки приводят к получению сухого продукта ненадлежащего качества (высушенный материал сильно термически разлагается).

Скорость сушильного агента практически ни оказывает никакого воздействия на значение равновесной влажности высушенного остатка послеспиртовой барды.

Количество влаги, оставшейся в сухом остатке, с увеличением температуры сушильного агента уменьшается.



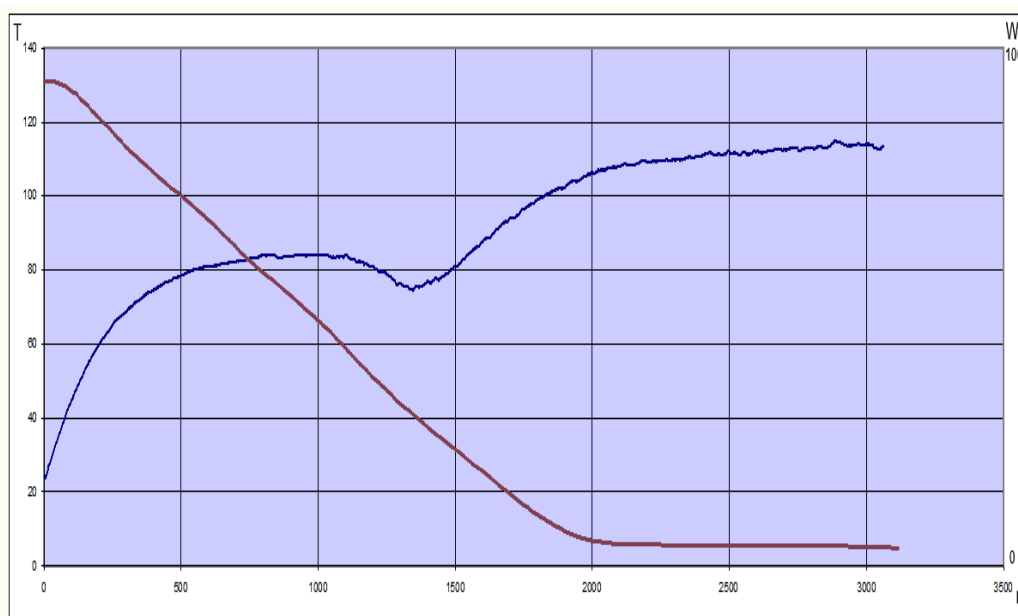
**Рис. 1. Кинетические кривые сушки капли барды:**

$T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $w = 3, 5, 7\text{ м/с}$ ; навеска – капля 0,05 г

При этом колебания влажности исходной жидкой послеспиртовой барды незначительны (от 90 до 93%).

Как следует из анализа кривой сушки и термограммы рис. 2, при постоянной скорости сушильного агента и увеличении температуры сушильного агента, уменьшается время сушки и увеличивается скорость сушки.

При исследовании кинетики сушки на подложках жидкой послеспиртовой барды, наблюдается формирование определенных структур. При всех исследованных режимах сушки поверхности высушиваемой барды формируется тонкая пленка.



**Рис. 2. Термограмма сушки слоя жидкой зерновой барды:**

$T = 142\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w = 3\text{ м/с}$ ; подложка стальная

Структурирование твердой фазы в пленке продолжается в течение всего процесса сушки и приводит к формированию особой структуры, названной нами коркой. Свойства сформировавшейся корки зависят от режима сушки. При мягких режимах корка медленно густеет по толщине от момента начала формирования корки до момента, когда скорость сушки практически равна нулю. При этом температура образца медленно приближается к температуре сушильного агента. Исследования срезов высушиваемого образца показали, что срез в процессе сушки имеет различный цвет: от темного на поверхности до светлого к подложке. При этом постоянно по времени сушки темнеет внутрь к подложке. Корка имеет неровную поверхность, на которой отчетливо выделяются отдельные крупные агломераты [1].

В результате проведенных работ было выявлено влияние на кинетику роста отложений, скорости течения жидкой барды вдоль поверхности, происхождения и, следовательно, свойств жидкой послеспиртовой барды.

Как показывают исследования кинетики сушки жидкой послеспиртовой барды в данных установках удельное энергопотребление схемы, в которой используются только сушилки, меньше удельного энергопотребления классической схемы в 1,5–2 раза (для спиртового завода производительностью 3000 дал/сут).

Рекомендуемая нами температура сушильного агента в сушилке (исходя из анализа качества получаемого сухого продукта) составляет 120 °С (рис. 2). Температуру отработанного сушильного агента для данных условий рекомендуется держать около 40...50 °С.

Как показали наши исследования по кинетике образования отложений на стенках сушильной камеры, период профилактической очистки сушильного оборудования увеличивается по сравнению с классической схемой на 20...30% [2].

Таким образом, применение выявленных рекомендаций для полной утилизации жидкой барды для завода типовой производительности будет одним из вариантов снижения удельного энергопотребления предприятий, а значит и себестоимости сухой послеспиртовой барды при сохранении качественных требований к готовому продукту.

#### *Список использованных источников*

1. Пахомова, Ю. В. Кинетика сушки капель жидких дисперсий на диффузионно-непроницаемых подложках : дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 ; Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2011. – 283 с. : ил.
2. Пахомов, А. Н. Экспериментальная установка для изучения кинетики формирования отложений на стенках теплообменных аппаратов / А. Н. Пахомов, Р. Ю. Банин, Е. А. Черных, Е. Ю. Ловягина // Новый университет. – 2014. – № 3–4(25–26). – С. 93 – 95.

#### *References*

1. Pakhomova, Yu. V. Kinetics of drying of droplets of liquid dispersions on the diffusion-impermeable substrates : dis. ... of cand. of techn. sciences: 05.17.08 ; Tamb. gos. tehn. univ. – Tambov, 2011. – 283 p. : il.
2. Pakhomov, A. N. Experimental setup to study the kinetics of the formation of deposits on the walls of heat exchangers / A. N. Pakhomov, R. Yu., Banin, E. A. Black, E. Yu. Lovyagina // New University. – 2014. – № 3–4(25–26). – P. 93 – 95.

УДК 544.722  
ББК 35.113

**Вязовов С. А.**

Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ  
БЕЛОФОРСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ**

**Viazovov S. A.**

Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**RESEARCH OF KINETIC CHARACTERISTICS OF OBRATNOOSMOTICHESKY  
PURIFICATION OF THE WATER SOLUTIONS CONTAINING A BELOFOR**

*Аннотация.* Проведены экспериментальные исследования кинетических характеристик процесса обратноосмотической очистки модельных и реальных белофоросодержащих растворов, с учетом влияния на них давления и концентрации. Проанализированы и найдены уравнения связи кинетических характеристик процесса обратноосмотического концентрирования модельных и реальных водных белофоросодержащих растворов.

*Ключевые слова:* белофор ОБ-жидкий, мембрана, обратный осмос, коэффициент задерживания, удельная производительность.

*Abstract.* Experimental studies of kinetic characteristics of reverse osmosis treatment process model and real beloforosoderzhaschih solutions, taking into account the effects on them of pressure and concentration. Analyzed and kinetic characteristics of the constraint equation of the process of reverse osmosis concentration model and real water beloforosoderzhaschih solutions.

*Keywords:* belofor OB-liquid membrane, reverse osmosis, retention coefficient, specific performance

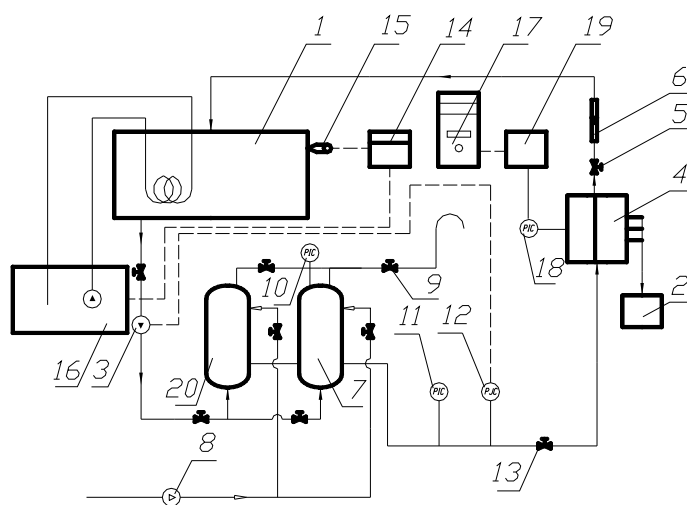
Во всем мире происходит интенсивное развитие мембранной технологии. Она широко применяется для концентрирования и разделения водных растворов солей в различных отраслях промышленности [1]. Успешное применение мембранной технологии с экономической, технологической и экологической точек зрения может быть эффективным при разумном ее сочетании с другими существующими методами (дистилляция, вымораживание, ионный обмен, сублимационная сушка, биологическая обработка и т.д.) [2].

**Экспериментальная часть.** В химической промышленности, при производстве оптических отбеливателей, образуется большое количество промышленных белофоросодержащих растворов, которые для дальнейшего использования необходимо сконцентрировать, а полученную очищенную воду вернуть обратно в производство.

Для исследования кинетических характеристик процесса обратноосмотической очистки водных белофоросодержащих растворов использовались различные типы промышленных мембран.

В качестве объектов исследования использовались модельные растворы, а также промышленные растворы, получаемые в процессах синтеза полупродуктов оптических отбеливателей на линиях ОАО «Пигмент» (г. Тамбов). В качестве модельных растворов использовались растворы веществ, входящие в состав промышленных стоков. Исследования удельной производительности и коэффициента задерживания мембран проводились на установке, представленной на рис. 1 [3].

Основным разделительным элементом установки является рабочая ячейка 4, в которой непосредственно происходит процесс обратноосмотического концентрирования. Из расходной емкости 1 через систему вентилях раствор нагнетался в камеру концентрирования плунжерным насосом НД 100/63 3. Пройдя дроссель 13, рабочую ячейку 4, дроссель 5 и ротаметр 6, частично разделенный раствор возвращался обратно в расходную емкость 1. Для контроля давления в установке предусмотрены образцовые манометры 10 и 11, электроконтактный манометр 12. Для исследования влияния пульсирующего потока на процесс концентрирования ячейка 4 была оснащена пьезоэлектрическим датчиком ЛХ-409 18, который подключен к крейтовой системе LTC-002/25 19. Это модульная система сбора данных с датчиков и управления в задачах промышленной и лабораторной автоматизации. Крейтовая система LTC-002/25, в свою очередь, подключена по коаксиальному кабелю к ПЭВМ 17. Температура раствора в системе поддерживалась водяным термостатом 16 и измерялась потенциометром 14 посредством термопары 15. Жидкость, прошедшая в процессе разделения через мембрану, собиралась в емкость 2. Регулировка давления в системе осуществлялась игольчатым вентилем 5. Аварийный сброс давления в системе осуществляется игольчатым вентилем 9. В установке предусмотрена система ресиверов 7 и 20, которые представляют собой цилиндрические сосуды объемом  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , предварительно заполненные сжатым воздухом компрессором 8, до давления, составляющего 10...40% от рабочего.



**Рис. 1. Схема экспериментальной обратноосмотической установки**

Значение коэффициента задерживания  $K$  определяли по формуле

$$K = 1 - (C_{\text{пер}} / C_{\text{исх}}). \quad (1)$$

где  $C_{\text{пер}}$  – концентрация белочного в пермеате,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация белочного в исходном растворе,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

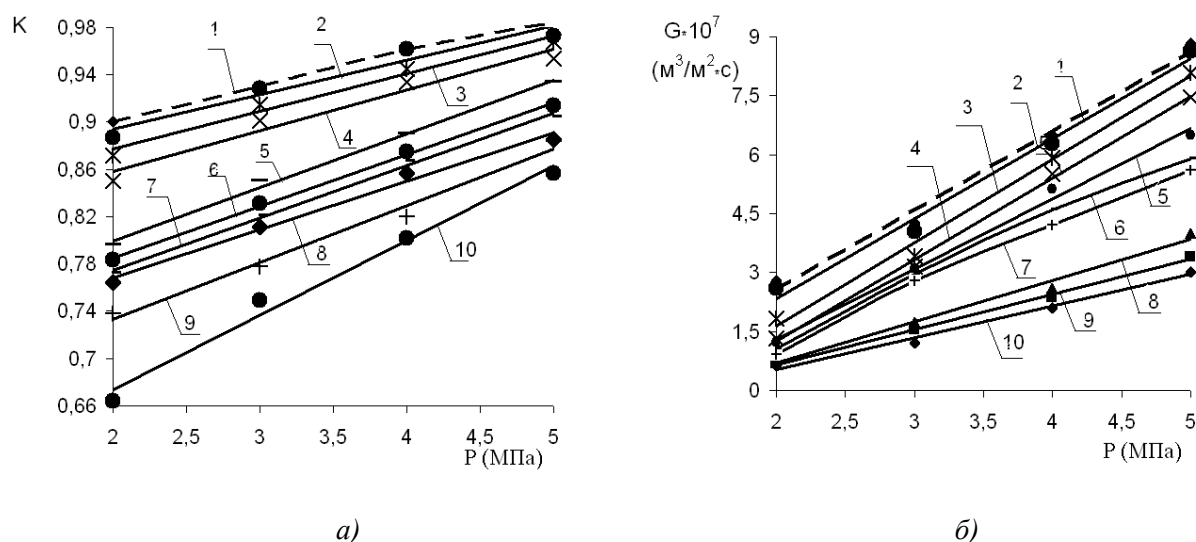
Значение удельной производительности  $G$  рассчитывали по зависимости

$$G = V / (F_{\text{м}} \tau). \quad (2)$$

где  $V$  – объем собранного пермеата,  $\text{м}^3$ ;  $F_{\text{м}}$  – концентрация белочного в исходном растворе,  $\text{м}^2$ ;  $\tau$  – объем собранного пермеата, с.

Результаты экспериментальных исследований и их анализ. Важными характеристиками процесса обратного осмоса являются коэффициент задерживания и удельная производительность. Они исследовались при наложении внешних факторов (давления, концентрации) на процесс концентрирования. Влияние различных параметров (давления, концентрации) изучали на мембранах ESPA, МГА, ОПМ-К и на растворах белочного ОБ-жидкого, концентрации 20,9...65,8  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

Проведенные эксперименты выявили следующие закономерности. На всех типах мембран с увеличением величины давления наблюдается увеличение коэффициента задерживания и удельной производительности мембран. Вероятно, это связано с увеличением конвективной составляющей процесса обратноосмотического концентрирования.



**Рис. 2. Зависимость значений коэффициента задерживания (а) и удельной производительности мембран (б) от давления и концентрации раствора белочного ОБ-жидкого. Эксперимент:**

мембрана ESPA: 1 –  $C_{\text{исх}} = 20,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 2 –  $C_{\text{исх}} = 20,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 3 –  $C_{\text{исх}} = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 4 –  $C_{\text{исх}} = 65,8 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; мембрана ОПМ-К: 5 –  $C_{\text{исх}} = 20,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 6 –  $C_{\text{исх}} = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 7 –  $C_{\text{исх}} = 65,8 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; мембрана МГА-95К: 8 –  $C_{\text{исх}} = 20,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 9 –  $C_{\text{исх}} = 45 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 10 –  $C_{\text{исх}} = 65,8 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Расчет: мембрана ESPA

Также исследовалось влияние на коэффициент задерживания и удельную производительность мембран поля давлений при различных исходных концентрациях раствора беллофора ОБ-жидкого. При увеличении концентрации беллофора ОБ-жидкого коэффициент задерживания для мембран МГА-95К, ESPA, ОПМ-К уменьшается, так как при концентрации более  $20 \text{ кг/м}^3$  доля воды в пограничном слое уменьшается (концентрационная поляризация), а активный слой мембраны обезвоживается [4]. Увеличение концентрации растворенных веществ, приводит к повышению осмотического давления раствора, что снижает эффективную движущую силу процесса, а также к возрастанию вязкости раствора.

При расчете коэффициента задерживания мембран использовалась модифицированная формула на основе предложенной Б. В. Дерягиным, Н. В. Чураевым, Г. А. Мартыновым, В. М. Старовым [6], которая для наших исследований имеет вид:

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{kk_1} - 1 \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{Ghk k_2}{P_d} \right) \right] \exp \left( - \frac{G \cdot 0,00021k_3}{D_0 \sqrt{w}} \right)}, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2, k_3$  – коэффициенты, зависящие от типа мембраны и раствора;  $k$  – коэффициент распределения;  $P_d$  – коэффициент диффузионной проницаемости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $G$  – удельная производительность по пермеату,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;  $w$  – скорость движения раствора в межмембранном канале.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что на удельную производительность мембран основное влияние оказывают рабочее давление в системе и концентрация вещества. С увеличением исходной концентрации раствора уменьшается и удельная производительность мембран. Это связано с изменением структуры пограничного слоя и говорит о влиянии осмотического давления на процесс.

С учетом полученных зависимостей удельной производительности от давления раствора над мембраной, концентрации и температуры получено следующее выражение:

$$G = k(P - \Delta\pi)C^n \left( \frac{T}{T_0} \right)^m, \quad (4)$$

где  $k, n, m$  – эмпирические коэффициенты;  $T_0, T$  – реперная (принятая 293 К) и рабочая температуры разделяемого раствора;  $C$  – исходная концентрация раствора.

После обработки экспериментальных данных были получены конкретные значения эмпирических коэффициентов  $k_1, k_2, k_3, k, n, m$  для исследованных растворов беллофора ОБ-жидкого и мембран МГА-95К, ОПМ-К, ESPA (табл. 1, 2). Сравнение экспериментальных значений с расчетными данными показало удовлетворительное совпадение.

### 1. Значения коэффициентов $k_1$ , $k_2$ , $k_3$ для раствора белофора ОБ-жидкого

| Мембрана | Раствор              | $k_1$                | $k_2$                  | $k_3$    |
|----------|----------------------|----------------------|------------------------|----------|
| МГА-95К  | Белофор<br>ОБ-жидкий | $0,68 \cdot 10^{-3}$ | 0,058289               | 1,111142 |
| ESPA     |                      | $9,64 \cdot 10^{-6}$ | $1,3969 \cdot 10^{-5}$ | 0,539192 |
| ОПМ-К    |                      | $6,09 \cdot 10^{-3}$ | 0,008975               | 0,488309 |

### 2. Значения коэффициентов $k$ , $n$ , $m$ для раствора белофора ОБ-жидкого

| Мембрана | Раствор              | $k \cdot 10^6$ | $n$      | $m$  |
|----------|----------------------|----------------|----------|------|
| МГА-95К  | Белофор<br>ОБ-жидкий | 1,79           | -0,24505 | -122 |
| ESPA     |                      | 16             | -0,12801 | -227 |

#### Выводы.

1. В результате проведенных экспериментов впервые получены данные и проанализировано влияние внешних факторов на технологический параметр процесса: коэффициент задерживания при разделении модельных растворов белофора ОБ-жидкого для промышленных обратноосмотических мембран. Установлено влияние различных параметров (давления, концентрации) на значение коэффициента задерживания. Получено модифицированное уравнение для расчета значения коэффициента задерживания с учетом изменения давления и концентрации раствора.

2. Для оценки производительности процесса по пермеату были получены экспериментальные данные и математическое выражение для расчета значения удельной производительности при разделении водных растворов белофоров на обратноосмотических мембранах. Наблюдается увеличение удельной производительности для всех исследуемых типов объектов с возрастанием рабочего давления и с уменьшением концентрации растворов, что говорит о разности давления рабочего и осмотического давления как об основной движущей силе процесса. Установлено, что удельная производительность при прочих равных условиях зависит от вида используемых мембран.

#### Список использованных источников

1. Дубицкая, Н. И. Применение метода обратного осмоса для очистки сточных вод / Н. И. Дубицкая, С. А. Перлов // Бумажная промышленность. – 1987. – № 6. – С. 5–6.
2. Пат. на изобретение RUS 2544696 02.11.2012. Способ удаления водорастворимых примесей из суспензий органических продуктов / Орехов В. С., Леонтьева А. И., Субочева М. Ю., Труфанов Д. Н.
3. Лазарев, С. И. Очистка технической воды на обратноосмотической установке плоскокамерного типа / С. И. Лазарев, В. В. Мамонтов, С. В. Ковалев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49, Вып. 9. – С. 52 – 54.

4. Мулдер, М. Введение в мембранную технологию / пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 513 с.
5. Хванг, С.-Т. Мембранные процессы разделения / С.-Т. Хванг, К. Каммермейер ; пер. с англ. ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – М. : Химия, 1981. – 464 с.
6. Дерягин, Б. В., Чураев Н. В., Мартынов Г. А. и др. // Химия и технология воды. – 1981. – Т. 3, № 2. – С. 99 – 104.

#### *References*

1. Dubitskaya, N. I. Application of reverse osmosis for wastewater treatment / N. I. Dubitskaya, S. A. Perlov // Paper industry. – 1987. – № 6. – P. 5–6.
2. Pat. RUS 2544696 02.11.2012. A method for removing water-soluble impurities from suspensions of organic products / Orekhov V. S., Leontiev A. I., Subocheva M. Yu., Trufanov D. N.
3. Lazarev, S. I. Purification of process water in the reverse osmosis installation plosko-kamernogo type / S. I. Lazarev, V. V. Mamontov, S. V. Kovalev // Math. universities. Chemistry and Chemical Engineering.technology. – 2006. – V. 49, Issue. 9. – С. 52 – 54.
4. Mulder, M. Introduction to membrane technology ; pen. with Eng. – М. : Mir, 1999. – 513 p.
5. Hwang, S.-T. Membrane separation processes / S.-T. Hwang, K. Kammermeyer ; Trans. from English ; Ed. Yu.I. Dytnerskogo. – М. : Chemistry, 1981. – 464 p.
6. Deriagin, B. V. Churaev N. V., MartynovG. A. et al. // Chemistry and technology of water. – 1981. – V. 3, № 2. – P. 99 – 104.

**Глазунова И. В.**

Липецкий государственный технический университет  
(Россия, г. Липецк)

## **ПРИМЕНЕНИЕ АДСОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРИРОДНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ЛИПЕЦКОЙ ОБЛАСТИ В ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

**Glazunova I. V.**

Lipetsk State Technical University  
(Russia, Lipetsk)

## **THE APPLICATION OF ADSORBENTS BASED ON NATURAL RESOURCES LIPETSK REGION IN ENVIRONMENTAL TECHNOLOGIES**

*Аннотация.* Получены адсорбенты на основе минеральных сырьевых ресурсов Липецкой области. Определены оптимальные условия получения адсорбентов. Рассмотрены возможные области применения адсорбентов. Доказана эффективность применения адсорбентов в природоохранных технологиях.

*Ключевые слова:* адсорбенты, получение, применение, природоохранные технологии.

*Abstract.* The adsorbents on the basis of mineral raw material resources of the Lipetsk region. The optimal conditions for obtaining adsorbents. The possible applications of adsorbents. Proved the effectiveness of the adsorbents in environmental technologies.

*Keywords:* adsorbents, preparation, application, environmental technologies.

Как известно постоянный рост промышленного производства и нерациональное использование природных ресурсов Земли, привело к появлению серьезных проблем в области экологии. Многие экологические проблемы начинаются на региональном уровне, и превращаются затем в глобальные проблемы, решение которых уже требует значительных затрат. В этой связи в последнее десятилетие научным коллективом подразделения по химической технологии Липецкого государственного технического университета проводятся исследования по направлению «Разработка технологий получения эффективных сорбентов для решения экологических проблем региона на основе сырьевой минеральной базы Липецкой области».

В ходе работы были получены и исследованы адсорбенты на основе торфа и природных силикатов. Выбор сырьевых материалов был обусловлен высокими адсорбционными свойствами ископаемых, низкой стоимостью и наличием крупных промышленных месторождений в Центрально – черноземном районе.

Процесс получения адсорбентов можно разбить на две самостоятельные группы:

1) получения адсорбентов на основе торфа. Получение адсорбентов проводили с использованием классической схемы, включающей две стадии (карбонизацию и акти-

вацию) при введении в смесь исходных компонентов минеральной добавки из алюмосиликатов (каолинита и монтмориллонита) [1].

Условия карбонизации, составляли: нагрев без доступа воздуха со скоростью 5...6 °С/мин до температуры 700 °С, карбонизация при заданной температуре – 0,25 ч. Активирование карбонизатов осуществляли диоксидом углерода и парами воды (парогазовая активация).

В случае применения химической активации проводили карбонизацию торфа совместно с каменным углем (связующее) и алюмосиликатом (минеральная добавка), обработанных 50% КОН, при температуре 750 °С в течение часа.

2) получение адсорбентов на основе природных алюмосиликатов путем иммобилизации на их поверхности органосилоксанов, отличающихся высокой термической, термоокислительной стабильностью и гидрофобностью. Прививку органосилоксанов осуществляли из толуольного раствора при температуре 80...100 °С в течение 2 – 8 ч. При получении адсорбентов из алюмосиликата в качестве модификаторов использовали органосилоксаны различного строения: гексаметилдисилоксан  $[(CH_3)_3Si]_2O$  (ГМДС), октаметилтетрасилоксан  $[(CH_3)_2SiO]_4$  (ОМТС), метилфенилциклотрисилоксан  $[CH_3C_6H_5SiO]_3$  (МФЦТС) [2].

В ходе экспериментальных исследований в каждом конкретном случае:

- определены оптимальные условия процесса получения адсорбентов; изучен механизм синтеза образцов; изучены термодинамические и кинетические параметры процесса получения адсорбентов;
- изучены адсорбционно-структурные характеристики, термостабильность, химический состав и адсорбционная активность, прочность полученных адсорбентов;
- установлена эффективность использования полученных адсорбентов в природоохранных мероприятиях для подготовки питьевой воды, очистки сточных вод промышленных предприятий от органических веществ, сбора нефтепродуктов как при разливе на твердой поверхности, так и с поверхности водных объектов.

Полученные адсорбенты обладают развитой пористой структурой, высокой удельной поверхностью и катионообменными свойствами.

Адсорбенты были опробованы в разнообразных технологических процессах, основой которых являются адсорбционные технологии.

Основное внимание было уделено очистке адсорбентами сточных вод от органических соединений и нефтепродуктов [3].

При непосредственном контакте адсорбционная емкость адсорбентов составляет 0,68...1,05 г/г, при определении с поверхности воды 0,61...1,86 г/г. Величина адсорбционной емкости по нефтепродуктам возрастает в ряду: нефть > керосин > ДТ > бензин. Данная зависимость находится в прямой зависимости от таких свойств как плотность и вязкость рассматриваемых веществ.

Анализ результатов исследования показал, что поглощение нефтепродуктов на рассматриваемых адсорбентах обусловлен силами межмолекулярного взаимодействия Ван-дер-Ваальса, относится к физической адсорбции. Протекает с высокой скоростью и

имеет сравнительно низкую теплоту адсорбции (8,8...12,9 кДж/моль). Соединения преимущественно адсорбируются в недиссоциированном состоянии. Процесс адсорбции протекает самопроизвольно. Реакции экзотермичны. Процесс адсорбции связан с локализацией молекул адсорбата на поверхности адсорбента, особенно на модифицированном каолините. Это косвенно свидетельствует о более глубоком проникновении рассматриваемых веществ в поры адсорбента и более прочном закреплении адсорбатов на поверхности сорбентов.

В ходе исследования закономерностей очистки сточных вод углеминеральными адсорбентами определены оптимальные условия проведения процесса адсорбции, необходимое количество адсорбента, адсорбционная емкость, степень очистки сточных вод (на примере промышленных сточных вод промышленных предприятий и АЗС г. Липецка), построены изотермы адсорбции, рассчитаны кинетические и термодинамические характеристики процесса адсорбции.

Кроме этого, хорошие результаты были получены при исследовании возможности применения сорбентов, полученных из сырьевых источников местных месторождений, в процессах очистки питьевых вод для хозяйственно-бытовых нужд населения [4].

Применение адсорбентов в процессах подготовки питьевой воды позволяет улучшить качество воды по таким показателям как общая жесткость, щелочность, нитраты, железо, перманганатная окисляемость. Жесткость питьевых вод снижается на 6...10%, щелочность – на 10...30%. Содержание железа в пробах воды, превышающих ПДК (0,3 мг/л) в 4 – 6 раз, снижается на 100%. Установлено снижение нитратов в среднем на 20%. Перманганатная окисляемость, характеризующая общее загрязнение воды органическими веществами, после применения адсорбентов снижается в 2 – 7 раз в зависимости от вида адсорбента. В отношении бора наблюдается тенденция снижения его содержания в воде в среднем на 27%.

Доказана эффективность применения адсорбентов для снижения содержания смол в топливе (бензине и ДТ) [5]. При содержании смол в пробах бензина, превышающих требования ГОСТ в 6 раз, в результате адсорбционной очистки бензина адсорбентами данный показатель снижается в 5 – 12 раз в зависимости от используемого адсорбента. Степень очистки бензина от смол составляет 75...92%. Снижение содержания смол в топливе приводит к уменьшению вредных выбросов, таких как оксиды азота, оксида углерода, канцерогенных веществ, которые ухудшают экологию окружающей среды и воздействуют на здоровье человека.

#### *Список использованных источников*

1. Глазунова, И. В. Физико-химические закономерности синтеза сорбентов на основе торфа и природного алюмосиликата [Текст] / И. В. Глазунова, Ю. Я. Филоненко, А. В. Сынков, В. Ф. Селеменев и др. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2007 – Т. 7, Вып. 5. – С. 784 – 790.
2. Глазунова, И. В. Особенности модифицирования поверхности каолинита органическими веществами [Текст] / И. В. Глазунова, Ю. Я. Филоненко // Изв. Вузов. Хим. и хим. технология. – 2003. – Т.46. – № 2. – С. 35 – 39.

3. Глазунова И. В. Исследование углеминеральных сорбентов в процессе очистки сточных вод от нефтепродуктов [Текст] / И. В. Глазунова, Ю. Я. Филоненко, Е. А. Седых, М. В. Веретина // Вестник ЛГТУ-ЛЭГИ. – Липецк. – 2010. – С.10 – 17.

4. Глазунова И. В. Особенности адсорбционной очистки питьевых вод углеминеральными сорбентами [Текст] / И. В. Глазунова, М. В. Веретина. Ю. Я. Филоненко, А. А. Васильева // Экология ЦЧО РФ. Липецк: ЛЭГИ. – 2010 – №1 (24) – С. 16 – 22.

5. Глазунова И. В. Исследование качества топлива автозаправок города Липецка [Текст] / И. В. Глазунова, А. А. Демихов, Н. Н. Кияшова // Вестник Липецкого государственного технического университета. Липецк. – 2015. – № 4(26) – С. 25 – 31.

#### *References*

1. Glazunov, I. V. Physico-chemical principles of synthesis of sorbents based on peat and natural aluminosilicate [Text] / I. V. Glazunov, Yu. Ya. Filonenko, V. A. Synkov, V. F. Selemeney, and others // Sorption and chromatographic processes. – 2007. – T. 7, V. 5. – P. 784 – 790.

2. Glazunov, I. V. Peculiarities of the surface modification of kaolinite by organosiloxane [Text] / V. I. Glazunov, Y. Filonenko, Izv. Universities. Chem. and chemical. technology. – 2003. – V. 46. – N 2. – P. 35 – 39.

3. Glazunov I. V. the Study of carbon-mineral sorbents in the purification of sewage from oil products [Text] / V. I. Glazunov, Yu. Ya. Filonenko, E. A. Gray, M. V. Veretin // Bulletin of the LGTU / LEG/. – Lipetsk. – 2010. – P. 10 – 17.

4. Glazunov I. V. Peculiarities of adsorption purification of drinking water carbon-mineral sorbents [Text] / V. I. Glazunov, M. V. Vereina. Y. Y. Filonenko, A. A. Vasiliev // Ecology of Central black earth region of the Russian Federation. Lipetsk: LEGI. – 2010. – N 1(24) – P. 16 – 22.

5. Glazunov I. V. Investigation of fuel quality of petrol stations of the city of Lipeck [Text] / V. I. Glazunov, A. A. Demikhov, N. N. Cechova // Bulletin of the Lipetsk state technical University. Lipetsk. – 2015. – N 4(26) – P. 25 – 31.

УДК 691.33  
ББК 30.69

**Доровских Д. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И СЕПАРАЦИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ЩЕБНЯ**

**Dorovskikh D. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **PNEUMATIC CONVEYING AND SEPARATION OF RUBBLE WASTE**

*Аннотация.* Производство строительных материалов сопровождается образованием твердых отходов пылевидного состава. Наличие примесей в отходах препятствует их применению в производстве, что ведет к негативному воздействию на окружающую среду.

*Ключевые слова:* отходы, отсев щебня, пневматический, сепарация.

*Abstract.* Production of building materials is accompanied by the formation of solid waste pulverized composition. The presence of impurities in the waste prevents its use in the manufacture, leading to a negative impact on the environment.

*Keywords:* waste, crushed stone screening, pneumatic, separation.

Одним из путей экономии материальных и энергетических ресурсов в производстве мелкозернистых бетонов является использование отходов различных видов производств.

Около трех тысяч карьеров, производящих нерудные материалы, и горно-обогатительных комбинатов разрабатывают месторождения для производства строительных материалов. В тоже время в процессе горных работ и при переработке горных породы образуется огромное количество отходов (отсевов дробления). По разным оценкам образуется от 18 до 25% отсева от перерабатываемой горной массы, а при получении щебня I и II группы по форме зерен эта цифра сможет достигать 30...36% и более в зависимости от структурно-текстурных особенностей пород. Для типовых предприятий со средней мощностью 500 тыс. м<sup>3</sup> образуется примерно от 120 до 170 тыс. м<sup>3</sup> отсева в году.

Росту объемов отходов приводит к образованию отвалов, занимающих значительные площади пахотной земли, а также к загрязнению воздушной и водной среды.

При существующих технологиях на операции дробления из измельчения приходится около 50% всех затрат, в первую очередь энергетических. Повторное вовлечение отсева дробления очень перспективно.

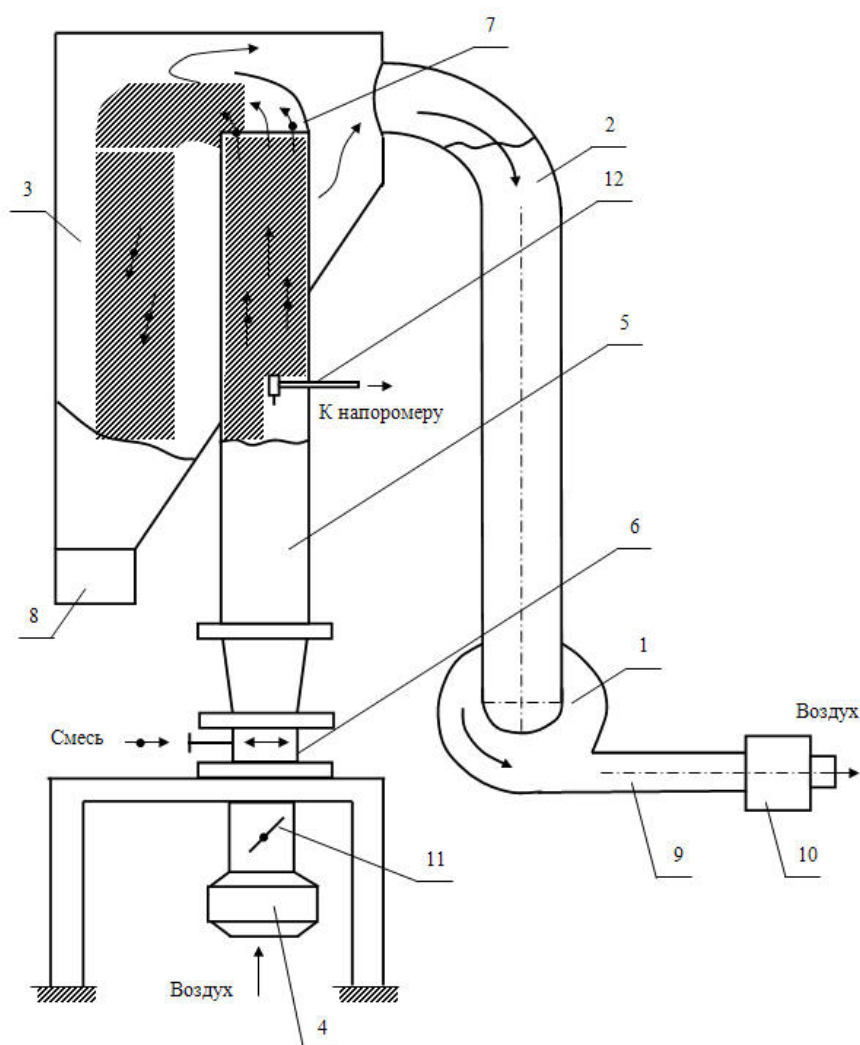
Однако, применение отсева щебня в производстве бетонов, по мнению ряда авторов [1, 2], сдерживается следующими причинами: пластинчатая их игловатая форма зерен; высокое содержание пылевидных частиц (18...25%).

Для отделения посторонних включений используется сепарация. В настоящее время существуют различные методы сепарации, в том числе магнитная сепарация, акустическая, электростатическая, разделением под действием гравитационных сил, центробежных сил, а также разделением по аэродинамическим свойствам пыли.

Из всех известных методов наиболее перспективными представляются методы аэродинамического разделения, что объясняется тем, что они позволяют разделить пылевидные отходы с достаточной эффективностью, являются экономичными и простыми в аппаратном оформлении.

Аэродинамический процесс сепарации характеризуется сложными механическими взаимодействиями между частицами, в связи с чем, возникла необходимость экспериментального определения скоростей витания отсевов щебня.

Исследования проводились на порционном парусном классификаторе ППК-ВИМ (рис. 1). Вентилятор 1 через воздуховод 2 отсасывает воздух из накопителя 3. В накопитель 3 воздух поступает через всасывающий насадок 4 и сепарирующий цилиндра 5.



**Рис. 1. Принципиальная схема порционного парусного классификатора:**

1 – вентилятор; 2 и 9 – воздуховоды; 3 – накопитель; 4 – всасывающий насадок;  
5 – сепарирующий цилиндр; 6 – обечайка; 7 – отражающая стенка; 8 – затвор;  
10 – фильтр; 11 – дроссель; 12 – трубка Пито

В этом потоке устанавливается выдвигаемая обечайка 6 с сепарируемым материалом – концентрично относительно сепарирующего цилиндра 5. После включения вентилятора 1 воздушный поток увлекает находящиеся в обечайке 6 компоненты сепарируемого материала, которые отражаясь от стенки 7, поступают в накопитель 3 и осаждаются в затворе 8. Отделяемый от сепарируемого материала воздух отводится через воздуховоды 9 и фильтры 10. Величина подачи воздуха в сепарирующий цилиндры 5 регулируется дросселем 11. Контроль скорости воздуха в сепарирующем цилиндре 5 осуществляется с помощью «трубки Питон» 12 и напоромера.

Исследование скоростей витания проводились для фракции отсева гранита размером:  $>2,5$  мм; (1,25...2,5) мм; (0,63...1,25) мм; (0,315...0,63) мм; (0,14...0,31) мм.

Для построения графика зависимости уноса частиц от скорости ( $V_B$ ), массы уловленных продуктов переводятся в процентное отношение к массе навески ( $D$ , %).

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2.

Анализы зависимости уноса частицы от диаметра и дисперсного состава унесенных из уловленных продуктов позволили получить графики зависимости скоростей витания от диаметра частицы отсева щебня гранитного, представленного на рис. 3.

Исследованием процесса пневматического транспортирования и разделения отсева щебня проводилось на экспериментальной установке, принципиальная схема ил общий вид которой приведены на рис. 4. Установка включает нагнетающий 3 или отсасывающийся 5 вентиляторы, шлюзовой питатель 2, отделители делового материала (пневмосепараторы) 4 и легких примесей 6.

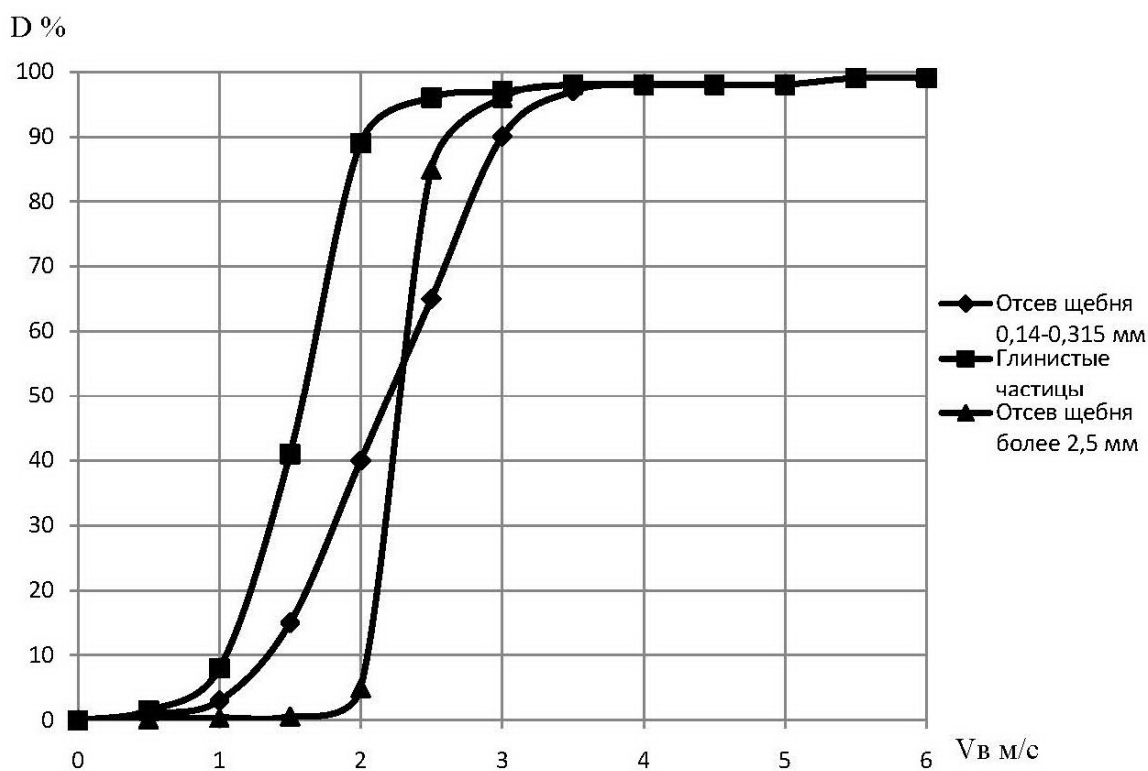
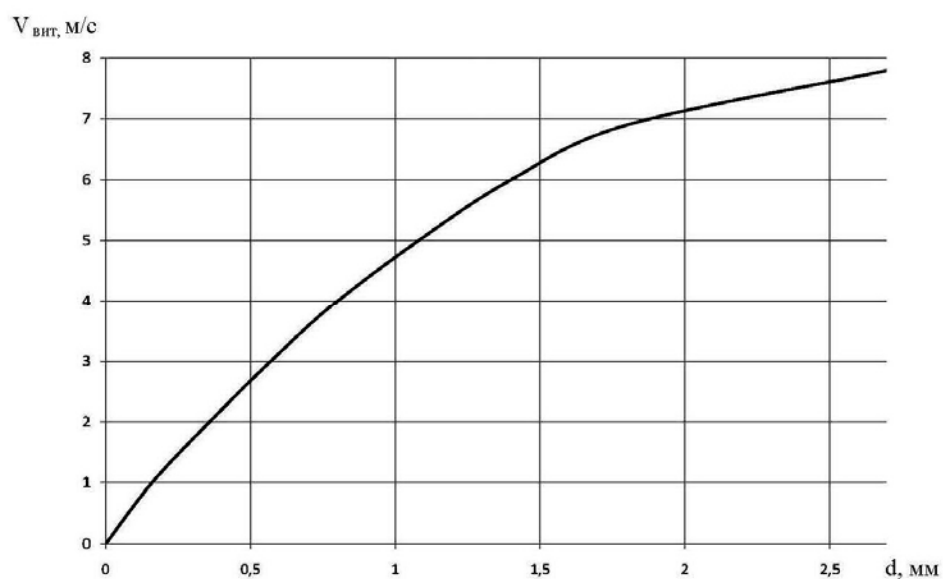
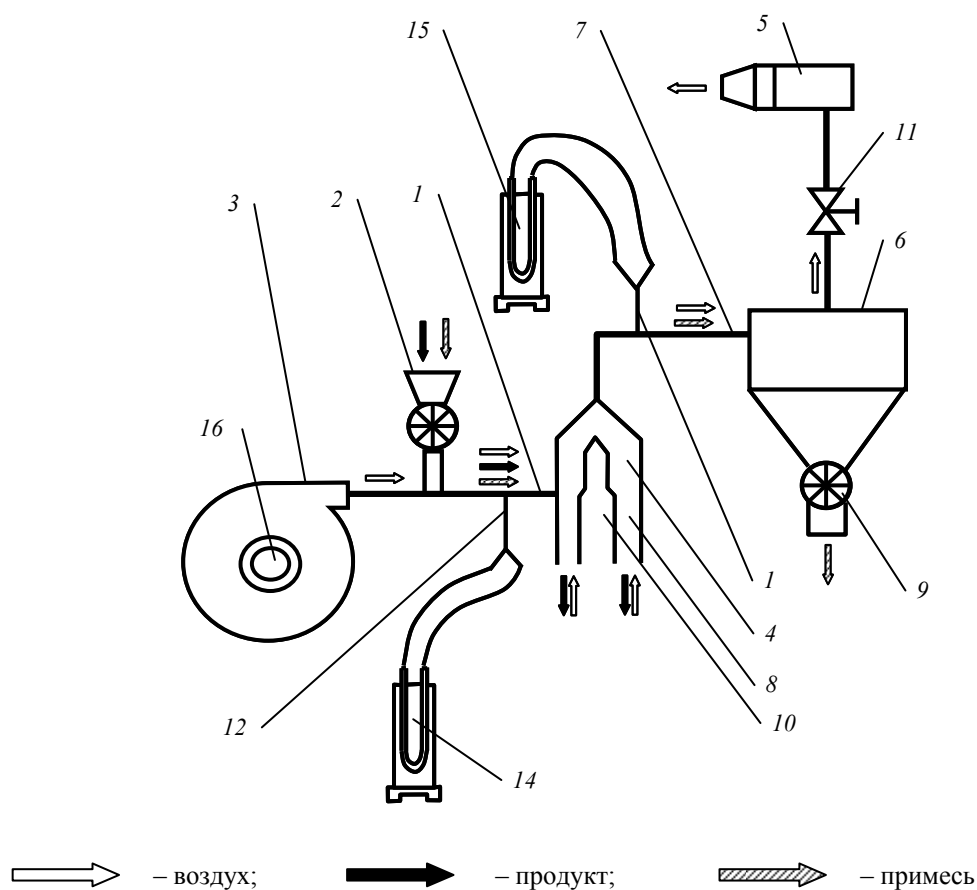


Рис. 2. Зависимость уноса частицы от скорости воздушного потока



**Рис. 3. Зависимость скоростей вращения для частиц отсеиваемого щебня**



**Рис. 4. Схема экспериментальной установки:**

1 – нагнетательный трубопровод; 2 – питатель; 3, 5 – нагнетающий и отсасывающий вентиляторы; 4, 6 – отделители делового материала (пневмосепаратор) и легких примесей; 7 – всасывающий трубопровод; 8 – выгрузной патрубок; 9 – шлюзовой затвор; 10 – сменные цилиндры; 11 – задвижка; 12, 13 – «трубки Пито»; 14, 15 – микроманометры; 16 – сменные диафрагмы

Для изменения скорости транспортирования смеси, были использованы сменные диафрагмы 16 устанавливаемые на всасывающемся патрубке нагнетательного вентилятора 3.

Концентрация исследуемой смеси варьировалась с помощью сменных задвижек устанавливаемых на впускном окне шлюзового питателя 2. Для регулирования скорости воздушного потока, в корпусе отделителя 4 и формирования направления движения частицы, использовались сменные цилиндры 10, различающиеся диаметром или высотой. Длины верхней или нижней частей отделителями изменялись сменными кольцами. Производительностью отсасывающего вентилятора регулировалась задвижкой 11. Скоростью воздушного потока в нагнетательном 1 или всасывающем 7 трубопроводах регистрировалась с помощью «трубок Питон» 12, 13 или микроманометров 14, 15, в соответствии с рекомендациями, изложенными в работах [3 – 6].

Экспериментальные исследования проводились при концентрациях сыпучего материала на входе в систему  $C$  равными соответственно 50, 100 и 150 г/м<sup>3</sup>. Результаты экспериментальных исследований представлены графически на рис. 5.

В результате проведенных исследований можно рекомендовать применение данного способа очистки отсева щебня гранитного для применения в строительстве. Отделенный щебень может быть использован для строительства дорог, в качестве крупного заполнителя для всех видов тяжелого бетона марки М-300 сборных и монолитных конструкций, изделий из деталей для устройства оснований усовершенствованных капитальных покрытий в соответствии с ГОСТ 9128–76 щебень пригоден для устройства оснований для дорог I и IV категории из горячих и теплых асфальтобетонных смесей типа В и холодных асфальтобетонов. Фракция менее 0,14 мм отсева щебня, которая содержит только глинистые 3 частицы, а также отделенные глинистые частицы других фракций можно использовать в производстве цемента, где необходима смесь известняка и глины.

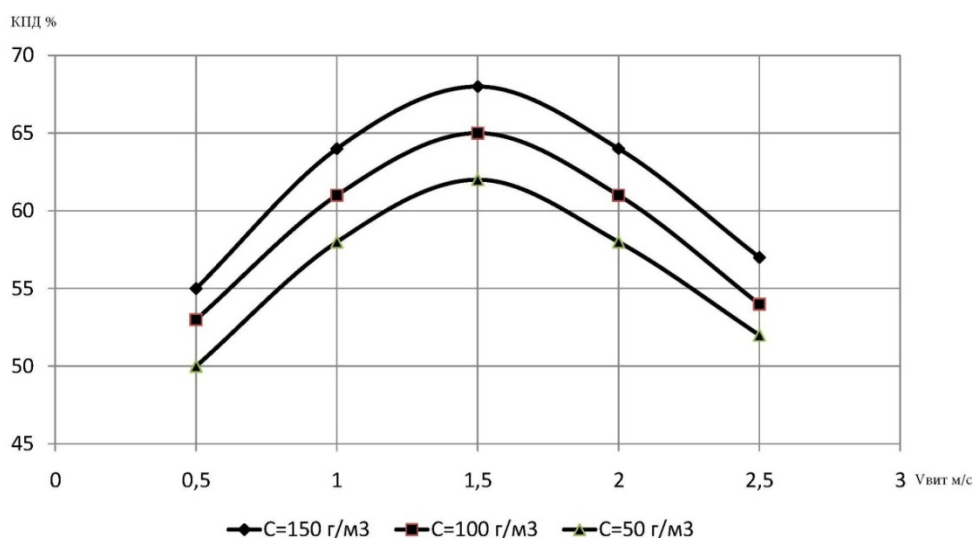


Рис. 5. Зависимость кпд разделителя от скорости витания компонентов

#### *Список использованных источников*

1. Харо, О. Е. Использование отходов переработки горных пород при производстве нерудных строительных материалов / О. Е. Харо, Н. С. Левкова, М. И. Лопатников, Т. А. Горностаева // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 18–19.
2. Артамонов, В. А. Опыт переработки отсеков дробления / В. А. Артамонов, В. В. Воробьев, В. С. Свитов // Строительные материалы. – 2003. – № 6. – С. 28–29.
3. Мурин, Г. А. Теплотехнические измерения. – М. : Энергия, 1979. – 424 с.
4. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
5. Соловцев, В. К. Контрольно-измерительные приборы. – М. : Высшая школа, 1969. – 272 с.

#### *References*

1. Haro, O. E. The use of waste rock in the manufacture of non-metallic building materials / O. E. Haro, N. S. Levkova, M. I. Lopatnikov, T. A. Gornostaeva // Building materials. – 2003. – N 9. – P. 18–19.
2. Artamonov, V. A. Experience recycling crushing screenings / V. A. Artamonov, V. V. Vorobyev, V. S. Svitov // Building materials. – 2003. – N 6. – P. 28–29.
3. Murin, G. A. Thermal measurements. – M. : Energia, 1979. – 424 p.
4. Preobrazhenskij, V. P. Thermal measurements and devices. – M. : Energia, 1978. – 704 p.
5. Solovtsov, V. K. Control and measuring devices. – M. : Higher School, 1969. – 272 p.

УДК 66.081.6  
ББК 35.113

**Ковалев С. В., Попов Р. В., Ковалева О. А., Лазарев Д. С.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, Тамбов)

## **КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОБАРОМЕМБРАННОГО АППАРАТА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ РАСТВОРОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

**Kovalev S. V., Popov R. V., Kovaleva O. A., Lazarev D. S.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **CONSTRUCTION ELEKTROBAROMEMBRANNOGO APPARATUS FOR THE SEPARATION OF SOLUTIONS ENGINEERING INDUSTRIES**

*Аннотация.* В работе представлена конструкция электробаромембранного аппарата рулонного типа, позволяющая извлекать катионы и анионы веществ в потоках прикатодного и прианодного пермеата.

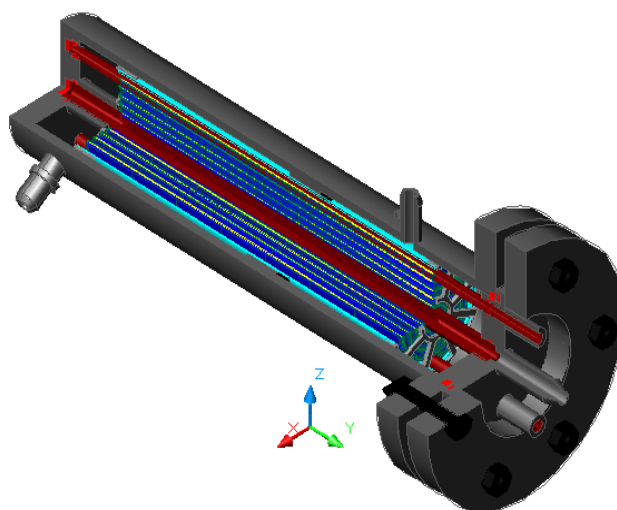
*Ключевые слова:* мембрана, электробаромембранные процессы, разделение, раствор.

*Abstract.* This paper presents elektrobaromembrannogo roll type design of the device, which allows extracting cations and anions substances in the pre-anode and cathode flows permeate.

*Keywords:* membrane, elektrobaromembrane processes, separation; solution.

Процессы мембранного разделения растворов, используемые на финишном этапе очистки технологических растворов химических и машиностроительных производств доказали свои несомненные преимущества, главная из которых является требуемая степень чистки до современных норм ПДК. Сложившиеся научные коллективы, занимающиеся проблематикой процессов мембранного разделения растворов, в настоящее время ускоренными темпами осуществляют исследования направленные на модификацию поверхностей катионообменных и анионообменных мембран, не уделяя должного внимания процессам разделения растворов с применением полупроницаемых полимерных мембран с усовершенствованными конструкциями аппаратов.

Отметим, что обязательным этапом проектирования схем очистки, разделения и концентрирования промышленных растворов и сточных вод является подбор оптимального очистного мембранного оборудования. Имеющиеся в настоящее время на мировом рынке конструкции мембранных аппаратов разделены по следующим типам: плоскокамерного, рулонного, трубчатого и половолоконного типа. Мембранными аппаратами обеспечивающими наибольшую площадь поверхности фильтрации являются аппараты рулонного типа, которые обеспечивают при их эксплуатации на производстве компактное расположение установок. При обработке растворов машиностроительных производств существует проблема не просто очистки и концентрирования растворов, а раздельного отвода потоков раствора содержащего катионы и анионы веществ, что упрощает процедуру обработки данного вида технологического раствора.



**Рис. 1. Электробаромембранный аппарат рулонного типа, наглядное изображение**

На рисунке 1 представлено наглядное изображение электробаромембранного аппарата, который обеспечивает решение следующих технических результатов: повышением качества, эффективности разделения растворов, улучшении охлаждения прикатодного, прианодного пермеата, простоты и удобства обслуживания и замены рулонного элемента.

Аппарат может быть использован для осуществления процессов электроультрафильтрации, электронанофильтрации, электромикрофильтрации и электрогиперфильтрации.

Аналогом данной конструкции является баромембранный аппарат рулонного типа, конструкция которого приведена в работе [1], а прототипом является аппарат, приведенный в патенте [2].

Аппарат работает следующим образом. Исходный раствор под давлением превышающем осмотическое давление растворенных в нем веществ, подается через штуцер подачи исходного раствора 10 (рис. 2), далее через сквозную проточку в центре крышки 39, рис. 2 под перфорированную трубку 14 разделенную на две секции одинакового объема по всей длине вертикальной перегородкой 43 прокачивается в ней и через эллиптические проточки 33 (рис. 2) поступает в пространство, где расположена сетка-турбулизатор 20 по разные стороны от которой расположены прианодные и прикатодные мембраны 49, 22 образующие межмембранный канал по всей длине которого циркулирует раствор, поступающий по эллиптической малой щели 31 (рис. 2) во внутреннюю трубку 27 (рис. 2) далее отводится по внутреннему пространству штуцера для отвода ретентата 38.

В этот же момент времени к дренажным сеткам, являющимся катодом 23 и анодом 48 (рис. 2) включением устройства для подвода электрического тока 24 (рис. 2) через электрические провода 29 соединенными через герметизирующую заливку 46 внешней отводной трубки 50, которые проходят через коллекторы для отвода прианодного, прикатодного пермеата 44, 45 (рис. 2) далее проходящие через отверстия 41 в фиксирующей прокладке 40, затем между неперфорированной перегородкой 26 (рис. 2) внешней и внутренней трубками 25, 27 соответственно и полимерными перфорированными перегородками 28 через отверстия 34 (рис. 2) к аппарату подводится внешнее постоянное электрическое поле с заданной плотностью тока.

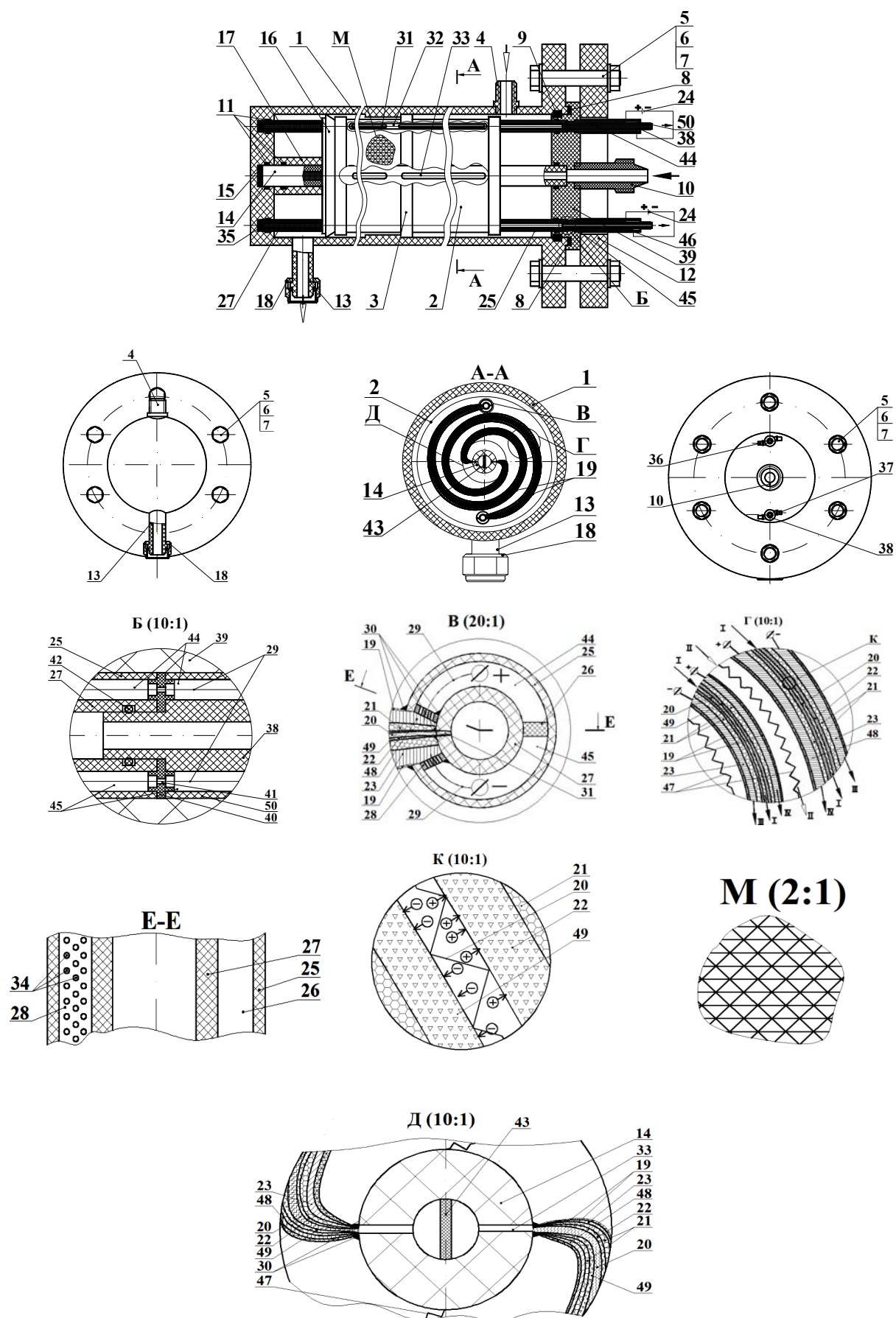


Рис. 2. Электробаромембранный аппарат рулонного типа

Раствор, двигаясь турбулизируется при помощи сетки-турбулизатора 20 (рис. 2), установленной в межмембранном канале около поверхности прианодных и прикатодных мембран 49, 22 в зависимости от схемы подключения дренажных сеток, являющихся анодом 48 и катодом 23 в зависимости от схемы подключения электродов «плюс» или «минус».

В межмембранном канале (рис. 2), растворенное в исходном растворе вещество диссоциирует на ионы, – анионы и катионы и под действием электрического тока и градиента давления проникают совместно с растворителем сквозь поры прианодных и прикатодных мембран 49, 22 соответственно и подложки мембран 21 попадая в пространства, где расположены дренажные сетки, являющиеся анодом 48 и катодом 23 в зависимости от схемы подключения электродов «плюс» или «минус» соответственно.

Полученный таким образом прианодный и прикатодный пермеат самотеком отводится через отверстия 34 (рис. 2) в полимерной перфорированной перегородке 28, на которую уложены концы дренажных сеток, являющихся анодом 48 и катодом 23 в зависимости от схемы подключения электродов «плюс» или «минус» попадая в коллекторы для отвода прианодного и прикатодного пермеата 44, 45 соответственно, далее отводятся через отверстия 41 (рис. 2) фиксирующей прокладки 40 по продолжающимся коллекторам для отвода прианодного и прикатодного пермеата 44, 45 и выводятся через штуцера для отвода прианодного и прикатодного пермеата 37, 36 (рис. 2) в виде кислот и оснований соответственно.

Одновременно с подачей исходного раствора, через штуцера для ввода и вывода охлаждающей воды 4, 13 (рис. 2) расположенные от горизонтальной оси в сечении под углами  $\pi/2$  и  $3\pi/2$  соответственно, а от торцевых поверхностей корпуса аппарата 1, глухой и разъемной на расстоянии 95 мм от края, заполняется коллектор для протекания охлаждающей воды, образованный между корпусом аппарата 1 изготовленным в виде цилиндрической обечайки одна из торцевых поверхностей которого глухая, непористой пленкой 19 имеющей насечки углубленные в половину от ее толщины, составляющих по форме равносторонние треугольники из прямолинейных отрезков, внешних трубок 25, перфорированной трубки 14 и крышки 39 (рис. 2).

Исходный раствор, протекая по всему межмембранному каналу, где расположена сетка-турбулизатор 20 (рис. 2), очищается от катионов и анионов, попадая через эллиптические малые щели 31 (рис. 2) внутрь внутренней трубки 27 и штуцера для отвода ретентата 38 (рис. 2) и выводится в виде ретентата.

Под повышением качества, эффективности разделения растворов, улучшении охлаждения прикатодного, прианодного пермеата понимается возможность при данном конструктивном исполнении электробаромембранного аппарата рулонного типа (рис. 2) совместить электробаромембранное разделение растворов с процессом более интенсивного охлаждения пермеата, чем в патенте [2], за счет изготовления непористой пленки 19, имеющей насечки углубленные в половину от ее толщины, составляющих по форме равносторонние треугольники из прямолинейных отрезков приинтенсивном прокачивании раствора через коллектор для протекания охлаждающей воды – с большей скоростью через штуцера для ввода и вывода охлаждающей воды 4, 13.

На разработанной конструкции электробаромембранного аппарата рулонного типа без наложения электрического поля можно проводить баромембранные процессы, например обратный осмос, ультрафильтрацию, нанофильтрацию, микрофильтрацию.

*Список использованных источников*

1. Дытнерский, Ю. И. Баромембранные процессы. – М. : Химия, 1986. – 272 с.
2. Пат. на изобретение RUS 2487746 01.06.2012. Электробаромембранный аппарат рулонного типа / Ковалев С. В., Лазарев С. И., Лазарев К. С., Соломина О. А.

*References*

1. Dytnerski, Yu. I. Baromembrane processes. – M. : Chemistry, 1986. – 272.
2. Pat. RUS 2487746 01.06.2012. Elektrobaromembraneroll type apparatus / Kovalev S. V., Lazarev S. I., Lazarev K. S., Solomina O. A.

УДК 66.081  
ББК Б20.18

**Кучерова А. Е., Герасимова А. В., Бураков А. Е., Романцова И. В., Мележик А. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **КИНЕТИКА АДСОРБЦИИ РВ(II) ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ НАНОКОМПОЗИТНЫМ СОРБЕНТОМ НА ОСНОВЕ ГРАФЕНА**

**Kucheroва A. E., Gerasimova A. V., Burakov A. E., Romantsova I. V., Melezhik A. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **KINETICS OF PB (II) ADSORPTION FROM AN AQUEOUS SOLUTION USING A GRAPHENE-BASED NANOCOMPOSITE SORBENT**

*Аннотация.* Исследована жидкофазная адсорбция ионов свинца Pb(II) из водных растворов наноккомпозитом на основе графеновых нанопластинок, модифицированных фенолформальдегидной смолой. Определены кинетические параметры процесса извлечения ионов Pb(II), максимальная сорбционная емкость составила 460 мг/г.

*Ключевые слова:* оксид графена, наноккомпозит, ионы свинца, кинетическая адсорбция.

*Abstract.* The liquid-phase adsorption of lead ions (Pb(II)) from aqueous solutions using a nanocomposite based on graphene nanoplatelets modified with a phenol-formaldehyde resin was studied. Kinetic parameters of the Pb(II) extraction process were determined. The maximum sorption capacity was found to be 460 mg/g.

*Keywords:* oxidized graphene, nanocomposites, lead ions (Pb<sup>2+</sup>), adsorption kinetic.

### **Введение**

Графен представляет собой пленку атомов углерода в состоянии sp<sup>2</sup>-гибридизации. Этот материал может эффективно использоваться для адсорбции газов и паров, вредных примесей органических веществ (красителей, нефти, нефтепродуктов и др.), а также ионообменной сорбции из водных растворов [1].

Для эффективного применения графена в процессах адсорбции ионов тяжелых металлов его необходимо функционализировать группами, способными к хемосорбции или ионному обмену. Наиболее известным способом функционализации графена является введение окисных групп. Так, продукт глубокого окисления графена, оксид графена (ОГ) представляет собой одиночный графеновый лист, по обе стороны которого находятся кислородсодержащие группы (эпоксидные, гидроксильные, карбоксильные), насыщающие свободные связи углеродных атомов, составляющих структуру графена. ОГ, в отличие от графена, способен образовывать устойчивые дисперсии в воде и в полярных органических растворителях, поскольку содержит на поверхности полярные группы [2].

Химическое восстановление ОГ дает графеновые вещества, промежуточные между ОГ и графеном. И ОГ, и его частично восстановленные формы обладают свойствами ионообменной адсорбции. Было показано, что ОГ способен эффективно извлекать Cu(II) [3], Pb(II) [4], Co(II) и др. [5 – 7]. Необходимо отметить, что ОГ является бифункциональным ионообменником, он способен сорбировать и катионы, и анионы [8].

В результате антропогенной деятельности в природные воды ежегодно попадает 500...600 тыс. т свинца [9]. Свинец может вызывать у населения хроническое отравление, проявляющееся в микроцитарной анемии; неврологические расстройства – свинцовая энцефалопатия. Для человека токсичными считаются суточные дозы свинца свыше 0,35 мг [10].

Таким образом, целью исследования являлась разработка эффективных адсорбентов на основе графена для соединений тяжелых металлов и изучение их адсорбционных свойств.

## 2. Материалы и методы

**2.1. Исходные вещества.** В работе использовались исходные вещества: графит природный марки ГСМ-2 (<0,5% минеральных примесей); персульфат аммония марки ЧДА; резольная водорастворимая фенолформальдегидная смола (ФФС) марки Фенотам GR-326 (Тамбов, Россия).

**2.2. Синтез графенового материала.** Расширенное соединение графита (РСГ) синтезировалось согласно методике, описанной в [11]. Графит интеркалировали раствором персульфата аммония в серной кислоте, затем выдерживали 3 часа при 40 °С для расширения, после чего проводили гидролиз и промывали водой до удаления кислоты. Добавление поверхностно-активных веществ способствует образованию более тонких ГНП. Полученные ГНП содержат на своей поверхности 9...13% масс. кислородсодержащих групп, что делает их подобными продуктам частичного восстановления оксида графита.

В работе [12] было найдено, что при использовании ФФС в качестве диспергатора процесс ультразвуковой эксфолиации РСГ протекает более эффективно, а достигаемые концентрации ГНП в водной дисперсии значительно выше, чем в случае применения обычных поверхностно-активных веществ.

Таким образом, для синтеза графеновых нанопластинок, функционализированных фенолформальдегидной смолой, в стакан емкостью 2 л поместили водную пасту РСГ, полученную из 5 г исходного графита, прибавили раствор ФФС и воду до общей массы 1500 г. Количество ФФС брали из расчета 0,5 масс.ч. сухого остатка ФСС на 1 масс.ч. графена, поскольку ранее такое соотношение было найдено как оптимальное для ультразвуковой эксфолиации РСГ [12]. Полученную суспензию обрабатывали ультразвуком в течение 6 часов, при непрерывном перемешивании механической мешалкой. Скорость потока охлаждающей воды регулировали так, чтобы поддерживать температуру в процессе ультразвуковой обработки около 40...45 °С. В результате получили коллоидную дисперсию, в которой массовое содержание ГНП (в расчете на графеновый углерод без окисных групп) равнялось 3,333 г/л, а ФФС (в расчете на сухой остаток) – 1,667 г/л. При этом олигомерные молекулы ФФС были химически связаны с поверхно-

стью ГНП, тем самым увеличивая количество групп, способных к координации и ионному обмену с ионами металлов.

**2.3. Методика проведения эксперимента.** Для изучения кинетических характеристик процесса адсорбции готовили модельные растворы нитрата свинца ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) с концентрацией 200...1040 мг/л. Эксперименты проводили в статических условиях при температуре  $20 \pm 2$  °С. В экспериментальные пробирки (50 мл), содержащие 0,01 г сорбента, вносили 15 мл модельного раствора, содержимое колбы встряхивали при 100 об/мин в ротаторах Bio RS-24 (Biosan, Рига, Латвия) в течение 10, 20, 30, 60, 90, 120, 240 мин. По окончании процесса сорбции растворы центрифугировали (Centrifuge 5810 R (Эппендорф, Гамбург, Германия)) на скорости 10 000 об/мин в течение 10 мин. Равновесные концентрации Pb (II) после процесса адсорбции определяли методом количественного элементного анализа по атомным спектрам поглощения на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915МД (ООО «Атомприбор», Санкт-Петербург, Россия).

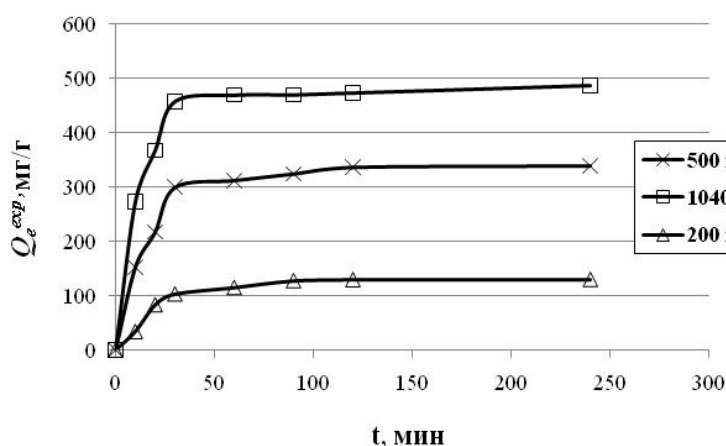
Адсорбционную способность функционализированного графена по извлечению ионов  $\text{Pb}^{2+}$  рассчитывали по формуле (1):

$$Q_e^{(\text{exp})} = \frac{(C_i - C_e)V}{m}, \quad (1)$$

где  $Q_e^{(\text{exp})}$  – количество адсорбируемого вещества на единицу массы сорбента в состоянии равновесия (мг/г), полученного в ходе эксперимента;  $C_i$  – исходная концентрация  $\text{Pb}^{2+}$  в растворе (мг/л);  $C_e$  – равновесная концентрация  $\text{Pb}^{2+}$  в растворе (мг/л);  $V$  – объем раствора (мл);  $m$  – масса сорбента (г).

**3. Результаты и их обсуждение.** На рисунке 1 представлена зависимость количества адсорбируемых ионов свинца ( $Q_e^{(\text{exp})}$ , мг/г) от времени ( $t$ , мин) при начальных концентрациях Pb (II) 200, 500 и 1040 мг/л.

Анализ приведенных кривых показывает, что в начальный момент времени адсорбция ионов Pb (II) протекает весьма интенсивно, затем незначительно замедляется и к 30 мин достигает постоянного значения (равновесное время контакта): 103 мг/г (200 мг/л), 299 мг/г (500 мг/л), 457 мг/г (1040 мг/л).



**Рис. 1. Влияние времени контакта функционализированного графена на адсорбцию ионов свинца из водных растворов**

Сравнивая полученные в работе значения адсорбционные емкости для функционализованного графена с данными по извлечению ионов свинца, приведенными другими исследователями (активированный уголь – 12...21 мг/г, бентонит – 23...32 мг/г, углеродные нанотрубки – 2...11 мг/г, функционализированный графен – 406 мг/г), можно утверждать, что полученная дисперсия функционализованного ФФС графена проявляет высокую адсорбционную способность, при этом сокращая время процесса извлечения в несколько раз [10, 13 – 16].

#### *Список использованной литературы*

1. Lü, M. J. Applications of graphene-based materials in environmental protection and detection / M. J. Lü, J. Li, X. Y. Yang, C. A. Zhang, J. Yang, H. Hu, X. B. Wang // Chinese Sci. Bulletin. – 2013. – N 58(22). – P. 2698 – 2710.
2. Loh, K. P. Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications / K. P. Loh, Q. Bao, G. Eda, and M. Chhowalla // Nat. Chem. – 2010. – N 2(12). – P. 1015 – 1024.
3. Wu, W. Q. Highly efficient removal of Cu(II) from aqueous solution by using graphene oxide / W. Q. Wu, Y. Yang, H. H. Zhou, T. T. Ye, Y. Z. Huang, R. Liu, F. Y. Kuang // Water Air Soil Poll. – 2013. – N 224(1). – P. 1372 – 1380.
4. Huang, Z. H. Adsorption of lead (II) ions from aqueous solution on low-temperature exfoliated graphene nanosheets / Z. H. Huang, X. Zheng, W. Lv, M. Wang, Q. H. Yang, F. Kang // Langmuir. – 2011. – N 27. – P. 7558 – 7562.
5. Zhao, G. Few-layered graphene oxide nanosheets as superior sorbents for heavy metal ion pollution management, Environ / G. Zhao, J. Li, X. Ren, C. Chen, X. Wang // Sci. Technol. – 2011. – N 45(24). – P. 10454 – 10462.
6. Sitko, R. Adsorption of divalent metal ions from aqueous solutions using graphene oxide / R. Sitko, E. Turek, B. Zawisza, E. Malicka, E. Talik, J. Heimann, A. Gagor, B. Feist, R. Wrzalik // Dalton Trans. – 2013. – N 45. – 5682 – 5689.
7. Romanchuk, A. Yu. Graphene oxide for effective radionuclide removal / A. Yu. Romanchuk, A. S. Slesarev, S. N. Kalmykov, D. V. Kosynkin, J. M. Tour // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2013. – N 15. – P. 2321 – 2327.
8. Hao, L. SiO<sub>2</sub>/graphene composite for highly selective adsorption of Pb(II) ion / L. Hao, H. Song, L. Zhang, X. Wan, Y. Tang, Y. Lv // J. Colloid Interface Sci. – 2012. – N 369(1). – P. 381 – 387.
9. Exposure to lead: a major public health concern [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.who.int/ipcs/features/lead.pdf>
10. Lars, Järup, Hazards of heavy metal contamination // British Medical Bulletin. – 2003. – N 68. – P. 167 – 182.
11. Melezhyk, A. V. Synthesis of graphene nanoplatelets from peroxosulfate graphite intercalation compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. – 2014. – N 5(2) – P. 294 – 306.
12. Герасимова, А. В. Исследование процессов получения дисперсии УНМ в фенолформальдегидных смолах : магистерская диссертация. – Тамбов, 2015. – 65 с.

13. Rao, M. M. Removal of some metal ions by activated carbon prepared from Phaseolus aureus hulls / M. M. Rao, D. K. Ramana, K. Seshiah, M. C. Wang, S. W. C. Chien // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – N 166(2–3). – P. 1006 – 1013.
14. Wang, S. Characterization of GMZ bentonite and its application in the adsorption of Pb (II) from aqueous solutions / S. Wang, Y. Dong, M. He, L. Chen and X. Yu // *Appl. Clay Sci.* – 2009. – N 43(2) – P. 164 – 171.
15. Xu, D. Removal of Pb(II) from aqueous solution by oxidized multiwalled carbon nanotubes / D. Xu, X. Tan, C. Chen and X. Wang // *J. Hazard. Mater.* – 2008. – N 154(1 – 3). – P. 407 – 416.
16. Deng, X. The adsorption properties of Pb (II) and Cd (II) on functionalized graphene prepared by electrolysis method / X. Deng, L. Lu, H. Li, F. Luo // *J. Hazard. Mater.* – 2010. – N 183. – P. 923 – 930.

### *References*

1. Lü, M. J. Applications of graphene-based materials in environmental protection and detection / M. J. Lü, J. Li, X. Y. Yang, C. A. Zhang, J. Yang, H. Hu, X. B. Wang // *Chinese Sci. Bulletin.* – 2013. – N 58(22). – P. 2698 – 2710.
2. Loh, K. P. Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications / K. P. Loh, Q. Bao, G. Eda, and M. Chhowalla // *Nat. Chem.* – 2010. – N 2(12). – P. 1015 – 1024.
3. Wu, W. Q. Highly efficient removal of Cu(II) from aqueous solution by using graphene oxide / W. Q. Wu, Y. Yang, H. H. Zhou, T. T. Ye, Y. Z. Huang, R. Liu, F. Y. Kuang // *Water Air Soil Poll.* – 2013. – N 224(1). – P. 1372 – 1380.
4. Huang, Z. H. Adsorption of lead (II) ions from aqueous solution on low-temperature exfoliated graphene nanosheets / Z. H. Huang, X. Zheng, W. Lv, M. Wang, Q. H. Yang, F. Kang // *Langmuir.* – 2011. – N 27. – P. 7558 – 7562.
5. Zhao, G. Few-layered graphene oxide nanosheets as superior sorbents for heavy metal ion pollution management, *Environ* / G. Zhao, J. Li, X. Ren, C. Chen, X. Wang // *Sci. Technol.* – 2011. – N 45(24). – P. 10454 – 10462.
6. Sitko, R. Adsorption of divalent metal ions from aqueous solutions using graphene oxide / R. Sitko, E. Turek, B. Zawisza, E. Malicka, E. Talik, J. Heimann, A. Gagor, B. Feist, R. Wrzalik // *Dalton Trans.* – 2013. – N 45. – 5682 – 5689.
7. Romanchuk, A. Yu. Graphene oxide for effective radionuclide removal / A. Yu. Romanchuk, A. S. Slesarev, S. N. Kalmykov, D. V. Kosynkin, J. M. Tour // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2013. – N 15. – P. 2321 – 2327.
8. Hao, L. SiO<sub>2</sub>/graphene composite for highly selective adsorption of Pb(II) ion / L. Hao, H. Song, L. Zhang, X. Wan, Y. Tang, Y. Lv // *J. Colloid Interface Sci.* – 2012. – N 369(1). – P. 381 – 387.
9. Exposure to lead: a major public health concern [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.who.int/ipcs/features/lead.pdf>
10. Lars, Järup, Hazards of heavy metal contamination // *British Medical Bulletin.* – 2003. – N 68. – P. 167 – 182.

11. Melezhyk, A. V. Synthesis of graphene nanoplatelets from peroxosulfate graphite intercalation compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. – 2014. – N 5(2) – P. 294 – 306.
12. Gerasimova, A.V. The investigation of the CNTs-dispersion development processes in phenol-formaldehyde resins : Master's thesis. – Tambov, 2015. – 65 p.
13. Rao, M. M. Removal of some metal ions by activated carbon prepared from *Phaseolus aureus* hulls / M. M. Rao, D. K. Ramana, K. Sessaiah, M. C. Wang, S. W. C. Chien // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – N 166(2–3). – P. 1006 – 1013.
14. Wang, S. Characterization of GMZ bentonite and its application in the adsorption of Pb (II) from aqueous solutions / S. Wang, Y. Dong, M. He, L. Chen and X. Yu // *Appl. Clay Sci.* – 2009. – N 43(2) – P. 164 – 171.
15. Xu, D. Removal of Pb(II) from aqueous solution by oxidized multiwalled carbon nanotubes / D. Xu, X. Tan, C. Chen and X. Wang // *J. Hazard. Mater.* – 2008. – N 154(1 – 3). – P. 407 – 416.
16. Deng, X. The adsorption properties of Pb (II) and Cd (II) on functionalized graphene prepared by electrolysis method / X. Deng, L. Lu, H. Li, F. Luo // *J. Hazard. Mater.* – 2010. – N 183. – P. 923 – 930.

УДК 66.081  
ББК (Б)20.18

**Нескоромная Е. А., Бабкин А. В., Бураков А. Е., Романцова И. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, Тамбов)

## **ИННОВАЦИОННЫЕ НАНОСОРБЕНТЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ**

**Neskoromnaya E. A., Babkin A. V., Burakov A. E., Romantsova I. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **ADVANCED NANOSORBENTS FOR ADDRESSING ENVIRONMENTAL ISSUES**

*Аннотация.* Предложено использование в качестве поглотителей углеродные нанотрубки серии «Таунит-М» (УНТ) и мезопористый углерод. Проведены экспериментальные исследования по извлечению органики из водных растворов, адсорбционная емкость составила 380 и 780 мг/г для УНТ и мезопористого углерода, соответственно.

*Ключевые слова:* адсорбция, углеродные нанотрубки, мезопористый углерод, метиловый оранжевый, адсорбционная активность.

*Abstract.* Using “Taunit-M” carbon nanotubes (CNTs) and mesoporous carbon as sorbents is considered herein. The experimental research was performed on removing organics from aqueous solutions. The adsorption capacity was found to be 380 and 780 mg g<sup>-1</sup> for the CNTs and mesoporous carbon, respectively.

*Keywords:* adsorption, carbon nanotubes, mesoporous carbon, methyl orange, adsorption capacity.

В настоящее время одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений науки является экология. В этой связи большое внимание уделяется вопросам комплексной очистки пресной воды и технической водоподготовке. Основная проблема состоит не только в ограниченности водных ресурсов, но и в их нарушенном элементном составе, в котором содержание вредных примесей превышает предельно допустимые нормы. Все живые организмы состоят на 70...80% из воды, что подтверждает значимость этого ресурса не только как растворителя и среды обитания, но и как основного функционального элемента большинства живых существ [1]. Недостаток качественно очищенной воды вызван высокими темпами развития урбанизации и промышленности, а также антропогенным фактором. К последнему относят несанкционированную вырубку лесов, неконтролируемый выброс бытовых и промышленных отходов и т.д.

Для решения глобальных экологических проблем значительное количество разработок отечественных и зарубежных ученых направлено на усовершенствование существующих методов водоподготовки, модифицирование стандартных поглотителей, создание уникальных материалов, способных извлекать широкий спектр загрязнителей различной химической природы из воды [2].

Физико-химические методы извлечения являются перспективным направлением в этой области развития. Основным представителем таких методов являются адсорбционные процессы, способные извлекать до 80% всех видов загрязнителей из водных растворов [3]. Как известно, на адсорбционные свойства материала влияет не только объем пористого пространства, но и структурные характеристики его поверхности [4].

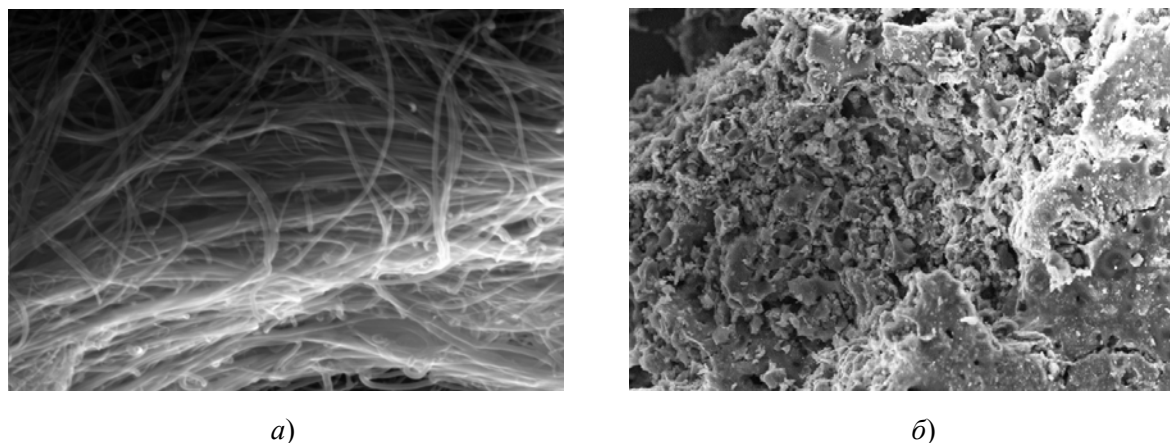
Данная работа направлена на изучение свойств углеродных наноструктурированных материалов, в частности, углеродных нанотрубок (УНТ) серии «Таунит-М» и мезопористого углерода (МПУ) [5 – 7], для применения их в качестве поглотителей в системах водоочистки.

Структурные характеристики материалов исследовались с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния (КР). СЭМ-изображения были получены в Междисциплинарном центре «Аналитическая микроскопия» Казанского (Приволжского) Федерального Университета с применением автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MERLIN (CARL ZEISS, ускоряющее напряжение 5kV, детектор InLins SE) (рис. 1).

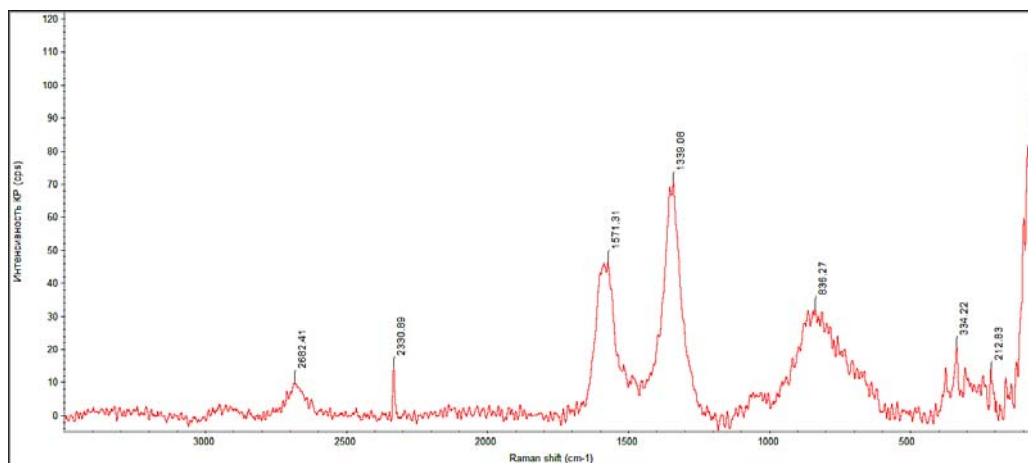
Для получения спектров комбинационного рассеивания (ЦКП «Получение и применение полифункциональных наноматериалов» ФГБОУ ВО «ТГТУ») применялся DXRRamanMicroscope (ThermoSCIENTIFIC, USA) с длиной волны возбуждения 532 нм.

Согласно полученным данным на спектре углеродного материала (рис. 2, а), отношение полос G и D, лежащих в диапазоне  $1500-1600\text{ см}^{-1}$  и  $1250-1450\text{ см}^{-1}$ , соответственно, показывает малое процентное содержание однослойных углеродных нанотрубок и аморфного углерода. Спектр комбинационного рассеяния мезопористого углерода свидетельствует об однородной и упорядоченной структуре материала образца.

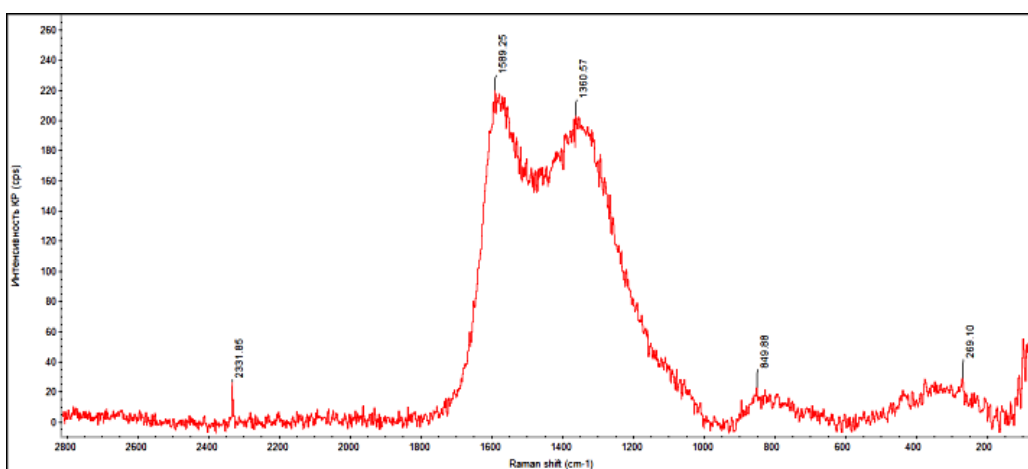
Для определения сорбционных свойств наноматериалов проводились исследования процесса сорбции органического красителя – метилового оранжевого (МО). Опираясь на методику спектрофотометрического анализа, описанную в ГОСТ 4453–74, количественный эксперимент осуществляли по следующей методике: в конические колбы объемом 50 мл, добавляли раствор различной исходной концентрации и навеску сорбента массой 0,03 г. В течение 45 мин колбы подвергались встряхиванию на программируемых ротаторах, далее, для разделения суспензии от взвешенных частиц пробы центрифугировали.



**Рис. 1. СЭМ-изображение поверхности углеродных материалов:**  
а – УНТ; б – МПУ



a)

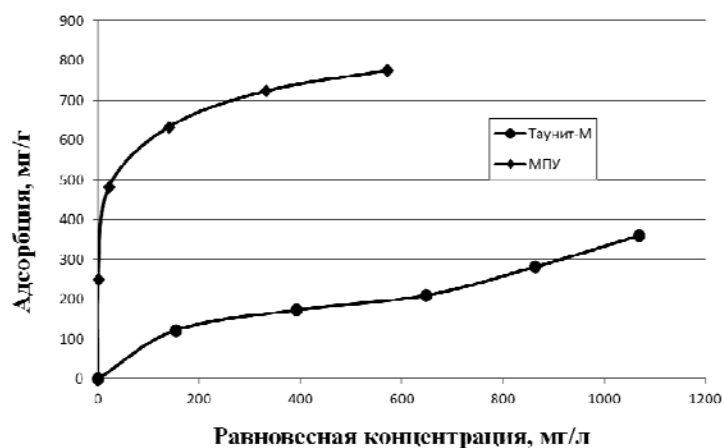


б)

**Рис. 2. КР-спектроскопия углеродных материалов:**

*a* – УНТ; *б* – МПУ

Концентрация очищенного раствора определялась с использованием прибора спектрофотометр ПЭ-5400В. По результатам проведенных исследований построены графики зависимости адсорбции МО в водном растворе от равновесной концентрации (рис. 3).



**Рис. 3. Изотермы сорбции органического красителя на углеродных нанотрубках и мезопористом углероде**

Адсорбция МО на стандартном активированном угле из кокосовой скорлупы составляет 50 мг/г [8, 9], а сорбционная емкость исследуемых в работе УНТ и МПУ имеет значения 380 и 780 мг/г, соответственно. Это говорит о перспективности применения последних в качестве новых сорбционных материалов.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований доказана актуальность и перспективность использования рассматриваемых наноматериалов как поглоателей в системах очистки водных ресурсов, принцип работы которых основан на адсорбционных процессах.

#### *Список использованных источников*

1. Роль воды в живом организме [Электронный ресурс]. – URL : [http://www.o8ode.ru/article/water/water\\_inside.htm](http://www.o8ode.ru/article/water/water_inside.htm)
2. Donglin, Zhao Adsorption of methyl orange dye onto multiwalled carbon nanotubes / Donglin Zhao, Weimeng Zhang, Changlun Chen, Xiangke Wang // International Symposium on Environmental Science and Technology. doi:10.1016/j.proenv.2013.04.120. – 2013. – V. 18. – P. 890 – 895.
3. Жилиева, А. В. Разработка экологически безопасного сорбента для очистки вод от нефтепродуктов и исследование его свойств / А. В. Жилиева, Т. Н. Мясоедова, Г. Э. Яловега // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 9(158). – С. 217 – 225.
4. Олонцев, В. Ф. Исследование адсорбционной активности углеродных материалов [Электронный ресурс] / В. Ф. Олонцев, А. А. Минькова, К. Н. Генералова. – URL : <http://vestnik.pstu.ru/>
5. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Изд-во Машиностроение, 2008. – 320 с.
6. Пат. 2531172 С2 МПК C01B 31/02 B82B 3/00 B82Y 40/00 Способ получения дисперсий углеродных нанотрубок / Ткачев А. Г., Мележик А. В., Однолько В. Г. – Заявка : 2012127987/05, 03.07.2012 ; опубл.: 20.10.2014.
7. Melezhyk, A. V. Synthesis of graphene nanoplatelets from peroxosulfate graphite intercalation compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // Nanosyst. Phys. Chem. Math., 2014. – V. 5. – P. 294 – 306.
8. Burakov, A. E. Liquid-Phase Adsorption of an Organic Dye on Non-Modified and Nano-modified Activated Carbons: Equilibrium and Kinetic Analysis / A. E. Burakov, I. V. Romansova, E. A. Neskornaya, A. V. Babkin, A. E. Kucheroва, A. G. Tkachev // Advanced Materials and Technologies, 2016. – Issue 1. – P. 42-48. – DOI: 10.17277/amt.2016.01.pp.042-048.
9. Нескоромная, Е. А. Создание гибридных углеродных наносорбентов комплексной очистки водных сред / Е. А. Нескоромная, А. В. Бабкин, А. Е. Бураков, И. В. Романцова, А. Е. Кучерова // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – С. 83 – 87.

#### *References*

1. The role of water in living organism [Electronic resource]. – URL : [http://www.o8ode.ru/article/water/water\\_inside.htm](http://www.o8ode.ru/article/water/water_inside.htm)

2. Donglin, Zhao Adsorption of methyl orange dye onto multiwalled carbon nanotubes / Donglin Zhao, Weimeng Zhang, Changlun Chen, Xiangke Wang // International Symposium on Environmental Science and Technology. doi:10.1016/j.proenv.2013.04.120. – 2013. – V. 18. – P. 890 – 895.
3. Zhilyaeva, A. V. The development of environmentally nonhazardous sorbent for water purification from oil products and study its properties / A. V. Zhilyaeva, T. N. Myasoedova, G. E. Yalovega // Proceedings of the Southern Federal University. Technical science. – 2014. – N 9(158). – P. 217 – 225.
4. Olontsev, V. F. Study of the adsorption activity of carbon materials [Electronic resource] / V. F. Olontsev, A. A. Min'kova, K. N. Generalova. – URL : <http://vestnik.pstu.ru/>
5. Mishchenko, S. V. Carbon nanomaterials. Production, properties, applications / S. V. Mishchenko, A. G. Tkachev. – M. : Publishing House of Mechanical Engineering, 2008. – 320 p.
6. Pat. of the Russian Federation No 2531172 A method producing the carbon nanotubes dispersions / Tkachev A. G., Melezhyk A. V., Odnolko V. G. – Application: 2012127987/05, 03.07.2012 ; publ.: 20/10/2014.
7. Melezhyk, A. V. Synthesis of graphene nanoplatelets from peroxosulfate graphite intercalation compounds / A. V. Melezhyk, A. G. Tkachev // Nanosyst. Phys. Chem. Math., 2014. – V. 5. – P. 294 – 306.
8. Burakov, A. E. Liquid-Phase Adsorption of an Organic Dye on Non-Modified and Nano-modified Activated Carbons: Equilibrium and Kinetic Analysis / A. E. Burakov, I. V. Romantsova, E. A. Neskornomnaya, A. V. Babkin, A. E. Kucherovala, A. G. Tkachev // Advanced Materials and Technologies, 2016. – Issue 1. – P. 42-48. – DOI: 10.17277/amt.2016.01.pp.042-048.
9. Neskornomnaya, E. A. Creating a hybrid carbon nanosorbents for the aqueous media complex purification / E. A. Neskornomnaya, A. V. Babkin, A. E. Burakov, I. V. Romantsova, A. E. Kucherovala // Problems of technogenic safety and sustainable development. – Tambov : Publishing House of the TSTU. – 2015. – P. 83 – 87.

УДК 574+628.3+631.8  
ББК 28.082+28.088+40.40

**Скопинцева Т. В., Козачек А. С., Конькова К. А.**

Тамбовский государственный технический университет (Россия, г. Тамбов)

## **ПОДБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД И ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В УДОБРЕНИЯ**

**Skopintseva T. V., Kozachek A. S., Kon'kova K. A.**

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

## **SELECTION OF EQUIPMENT FOR WASTEWATER AND WASTEWATER SLUDGE INTO FERTILIZER**

*Аннотация.* В данной работе представлена и описана технологическая схема переработки сточных вод и осадков сточных вод в удобрения.

*Ключевые слова:* очистка, ионный обмен, сточные воды, удобрения.

*Abstract.* This paper presents and describes the technological scheme of recycling of waste water and sewage sludge into fertilizer.

*Keywords:* purification, ion exchange, wastewater, fertilizer.

В настоящее время очистка сточных вод важна, так как биогенные элементы в больших количествах вызывают эвтрофикацию водоемов [1]. Это вызывает ухудшение экологических свойств, что, в свою очередь, способствует росту и экономических издержек [2, 3].

Существует большое количество разнообразных методов очистки сточных вод [4 – 6]. При этом главной проблемой становится необходимость подбора оборудования водочистки применительно к конкретным ситуациям [7, 8]. Одним из важнейших критериев подбора водоочистного оборудования становится здоровье человека [9], а также водных организмов [10].

Для очистки таких сточных вод мы предлагаем использовать технологическую схему, которая включает такое оборудование, как молекулярное сито, реактор, катионообменный фильтр, анионообменный фильтр. Указанная схема позволяет не только снизить антропогенную нагрузку на водоемы, но и получить полезные продукты в виде неорганических удобрений, что является одним из аспектов рационального использования водных ресурсов, общепринятым в мировой практике [11].

Рассмотрим каждый аппарат в отдельности.

Молекулярное сито состоит из синтетических кристаллических алюмосиликатов. Кристаллические структуры имеют трехмерную систему пор с отверстием определенного диаметра. В результате одинаковые по форме и размеру отверстия осуществляют адсорбцию молекул меньшего диаметра, таким образом, более крупные молекулы

не адсорбируются. Вследствие такого эффекта просеивания молекулярное сито и получило свое название.

Далее рассмотрим ионный обмен и ионообменники.

Для удаления из воды катионов и анионов ионный обмен является эффективным методом. Удаление ионов – это важная стадия очистки, которая используется как этап предварительной очистки, так и для получения очищенной воды [12].

Ионообменники – это аппараты для очистки воды, внутри которых находятся ионообменные смолы. Через эти смолы проходит загрязненная вода и очищается.

Ионообменные смолы подразделяются на анионообменные и катионообменные. Катионообменные смолы включают в себя функциональные группы, которые обмениваются положительными ионами, а анионообменные, в свою очередь, обмениваются отрицательными ионами.

У ионообменных смол существуют значительные недостатки, в результате которых использование смол затрудняется:

- множество смол имеют низкую гидрофильность, что является причиной малой скорости трансфера ионов через поверхность гранул ионита и низкой скорости поглощения и десорбции;
- смолы чаще всего применяют в виде гранул, которые во время процесса сорбции уплотняются. В ходе этого возникает необходимость постоянного принудительного взрыхления, которое приводит к постепенному механическому разрушению гранул в процессе эксплуатации;
- смолы следует часто регенерировать для восстановления обменной способности.

В числе ионообменных аппаратов выделяют аппараты, использующие отдельно катионит и анионит, а также аппараты, в которых присутствует смешанный слой.

Аппараты с отдельным слоем спроектированы так, что две колонны размещены друг за другом. Одна из них наполнена катионитом, она же и должна быть первой, а другая наполнена анионитом. Аппараты со смешанным слоем состоят из одной колонны, которая заполнена смесью ионообменных смол.

На данной технологической схеме стоят аппараты первого типа, так как я считаю, что у них большая степень очистки, чем у второго типа.

К плюсам ионного обмена можно отнести малые капитальные вложения, простота метода, возможность повышения производительности оборудования.

Реактор – это аппарат, в котором осуществляется химическая реакция.

Таким образом, нами рассмотрено и обосновано оборудование для очистки сточных вод и осадков сточных вод с целью получения неорганических удобрений. Данная технология может быть пригодна и для предотвращения процессов эвтрофикации в водоемах в результате уменьшения объемов сбрасываемых сточных вод.

#### *Список использованных источников*

1. Козачек, А. В. Безопасность водных экосистем и проблемы реализации процесса очистки сточных вод от биогенных веществ / А. В. Козачек, Ю. В. Зеленева, Т. В. Скопинцева, А. Г. Синельников, К. А. Конькова, М. И. Михайлин // Вестник Там-

бовского государственного технического университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – Т. 20. – Вып. 1. – С. 219 – 222.

2. Козачек, А. В. Влияние деятельности по обеспечению рационального природопользования и защиты окружающей среды на экономическое развитие региона // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2009. – № 2(16). – С. 153 – 158.

3. Козачек, А. В. Экономические последствия загрязнения водной среды и ухудшения здоровья человека и проблемы разработки технологических схем очистки воды / А. В. Козачек, А. Ю. Комова // Образование и здоровье. Экономические, медицинские и социальные проблемы : сб. статей III Междунар. науч.-практ. конф., декабрь 2008 г. – Пенза : ПДЗ, 2008. – С. 40 – 43.

4. Суворова, Ю. А. Анализ классификаций методов очистки сточных вод на предприятиях машиностроительной отрасли / Ю. А. Суворова, А. В. Козачек // Современные технологии в машиностроении : сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф., декабрь 2009. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2009. – С. 229 – 231.

5. Суворова, Ю. А. Сравнение существующих способов обеззараживания бытовых и производственных сточных вод / Ю. А. Суворова, А. В. Козачек // Современные технологии в машиностроении : сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф., декабрь 2009. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2009. – С. 233 – 236.

6. Козачек, А. В. Анализ технологий очистки фосфатсодержащих сточных вод / А. В. Козачек, Т. В. Скопинцева, А. Г. Синельников // В мире научных открытий : материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Таганрог, 27 декабря 2014 г.) : сб. науч. трудов / науч. ред. д-ра пед. наук, проф. И. А. Рудакова. – М. : Изд-во «Спутник +», 2014. – С. 217 – 219.

7. Суворова, Ю. А. Основные технико-экономические факторы выбора метода очистки сточных вод / Ю. А. Суворова, А. В. Козачек // Проблемы и возможности современной науки: сб. материалов 3-ей Междунар. науч.-практ. конф.: 25 декабря 2009 г. – Тамбов : Изд-во Тамбовпринт, 2009. – С. 93 – 95.

8. Суворова Ю. А., Козачек А.В. Вопросы выбора методов разделения ионных растворов сточных вод / Ю. А. Суворова, А. В. Козачек // Экологические проблемы современности : сб. статей VI Междунар. науч.-практ. конф., январь 2010. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2010. – С. 90 – 92.

9. Козачек, А. В. Здоровье человека и требования к системам биологической очистки сточных вод / А. В. Козачек, Т. В. Скопинцева, А. Г. Синельников, К. А. Конькова, М. И. Михайлин // Качество здоровья и профессиональное образование : материалы науч.-практ. конф. (г. Владивосток, ГБОУ ВПО ТГМУ 23 апреля 2015 г.) / отв. ред.: канд. культур., доц. Е. Н. Гринько. – Владивосток, 2015. – С. 203 – 209.

10. Козачек, А. В. Методика расчета ущерба рыбным ресурсам в зависимости от интенсивности антропогенного воздействия на участок водного объекта / А. В. Козачек, Е. А. Краснова // Проблемы экологии в современном мире в свете учения В. И. Вернадского : материалы Междунар. конф. 3–4 июня 2010 г. / гл. ред. В. М. Юрьев ; Админи-

страция Тамб. обл. и др. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2010. – В 2 т. – Т. 1. – С. 193 – 198.

11. Козачек, А. В. Обеспечение экологической безопасности в рамках системы рационального природопользования и защиты окружающей среды в европейских сообществах // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2008. – № 4(14). – Т. 2. – С. 167 – 171.

12. Тюрин И. А. Разработка технологии нанополимерных композитов «Поликон К» многофункционального назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.06 / И. А. Тюрин ; Саратов. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю. А. – Саратов, 2013. – 137 с.

### *References*

1. Kozachek, A. V. Safety of aquatic ecosystems and problems of implementation of the process of wastewater treatment from nutrients / A. V. Kozachek, V. Zeleneva, V. T. Skopintseva, A. G. Sinel'nikov, K. A. Konkov, A. I. Mikhaylin // Bulletin of Tambov University. Series: Natural and technical Sciences. – 2015. – Т. 20. – В. 1. – P. 219 – 222.

2. Kozachek, A. V. Influence activities to ensure rational nature management and environmental protection on the economic development of the region // Questions of modern science and practice. University. V. I. Vernadsky. – 2009. – N 2(16). – P. 153 – 158.

3. Kozachek, A. V. Economic consequences of pollution and deterioration of human health problems and the development of technological schemes of water treatment / A. V. Kozachek, A. Yu. Komova // Education and health. Economic, health and social problems : collection of articles III international. scientific.-pract. Conf. December 2008. – Penza : PDZ, 2008. – P. 40 – 43.

4. Suvorova, Yu. A. Analysis of the classifications of wastewater treatment at the enterprises of machine-building industry / Yu. A. Suvorova, A. V. Kozachek // Modern technologies in engineering : collection of papers of the XIII Intern. scientific.-pract. Conf. December 2009. – Penza : Volga House of knowledge, 2009. – P. 229 – 231.

5. Suvorova, Yu. A. Comparison of existing methods of decontamination of domestic and industrial wastewater / Yu. A. Suvorova, A. V. Kozachek // Modern technologies in engineering : collection of papers of the XIII Intern. scientific.-pract. Conf. December 2009. – Penza : Volga House of knowledge, 2009. – P. 233 – 236.

6. Kozachek, A. V. Analysis of technologies for the treatment of phosphate wastewater / A. V. Kozachek, V. T. Skopintseva, A. G. Sinel'nikov // In the world of scientific discoveries : Mat-ly mezhdunar XIV. scientific.-pract. Conf. (Taganrog, December 27, 2014) : SB. nauch. papers / scientific. ed., Ph. D., Professor I. A. Rudakov. – M. : Publishing house "Sputnik +", 2014. – P. 217 – 219.

7. Suvorova, Yu. A. The Main techno-economic factors the choice of treatment method / Yu. A. Suvorova, A. V. Kozachek // Challenges and opportunities of contemporary science : proceedings of the 3<sup>rd</sup> Intern. scientific.-pract. Conf.: 25 Dec 2009 – Tambov : Publishing house of Tambovprint, 2009. – P. 93 – 95.

8. Suvorova, Yu. A. Questions of the choice of methods for separation of ionic solute sewage / Yu. A. Suvorova, A. V. Kozachek // Ecological problems of modernity : collection

of articles VI international. scientific.-pract. Conf. January 2010. – Penza : Privolzhsky House of knowledge, 2010. – P. 90 – 92.

9. Kozachek, A. V. Human health and the requirements of biological wastewater treatment / A. V. Kozachek, V. T. Skopintseva, A. G. Sinel'nikov, K. A. Konkova, A. I. Mikhaylin / Quality health and professional education : Mat. nauch. -pract. Conf. (Vladivostok, SEI HPE TSMU 23 APR 2015) / ed. edit: Cand. crops., Assoc. E. N. Grinko. – Vladivostok, 2015. – P. 203 – 209.

10. Kozachek, A. V. Methodology of calculation of damage to fish resources depending on the intensity of anthropogenic impacts on land water body / A. V. Kozachek, E. A. Krasnova // Problems of ecology in the modern world in light of the doctrine of V. I. Vernadsky : Mat-ly mezhdunar. Conf. 3-4 June 2010 / ed. by V. M. Yur'ev ; Administration of Tamb. et al. – Tambov : Publishing house TSU named after G. R. Derzhavin, 2010. – 2 vols, V. 1. – P. 193 – 198.

11. Kozachek A. V. Ecological safety within the framework of an environmental management system and environmental protection in the European communities // Questions of modern science and practice. University. V. I. Vernadsky. – 2008.– N 4(14). – V. 2. – P. 167 – 171.

12. Tyurin I. A. Development of technology of nanopolymeric composite of Polikon Kmulti-purpose : dis. ...kand. tech. sciences: 05.17.06 / I. A. Tyurin ; a protection Place: Sarat. Gov. Tehn. Univ named after Yuri Gagarin. – Saratov, 2013. – 137 p.

УДК 628.54:66.081.6  
ББК Л113.9

**Шестаков К. В., Лазарев С. И.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РАСТВОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ НИКЕЛЬ**

Shestakov K. V., Lazarev S. I.  
Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

**KINETIC CHARACTERISTICS STUDY OF REVERSE OSMOSIS SEPARATION  
OF INDUSTRIAL SOLUTIONS CONTAINING NICKEL IONS**

*Аннотация.* В данной работе установлена зависимость удельного потока растворителя и коэффициента задержания от давления для мембран МГА-95 и ОМПН при обратноосмотическом разделении промышленных растворов, содержащих ионы  $\text{Ni}^{2+}$

*Ключевые слова:* мембрана, обратный осмос, удельный поток растворителя, коэффициент задержания, печатные платы.

*Abstract.* The dependence of the specific solvent flow and retention coefficient from pressure for reverse osmosis separation of industrial solutions containing  $\text{Ni}^{2+}$  ions with help MGA-95 and OMPN membrane was determined in this study.

*Keywords:* membrane, reverse osmosis, specific solvent flow, retention coefficient, printed circuit boards.

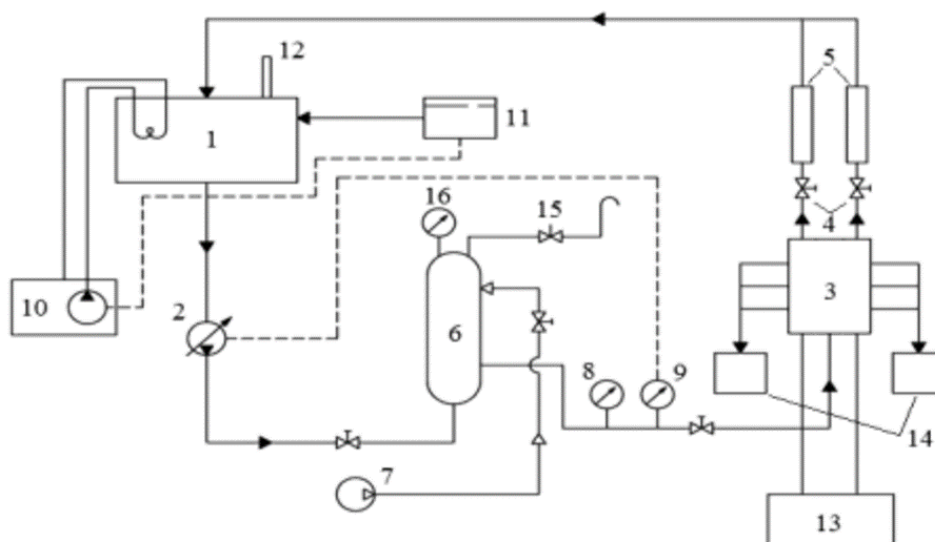
**ВВЕДЕНИЕ**

Сегодня спектр применения мембранных технологий достаточно высок. Это химическая, пищевая, сельскохозяйственная промышленность, медицина и т.д. Но одним из направлений, в котором они наиболее часто применяются, является очистка сточных вод различных гальванопроизводств, в том числе и производства печатных плат. Такие сточные воды характеризуются значительным содержанием опасных загрязняющих веществ, таких как ионы тяжелых металлов, неорганические кислоты и щелочи, органические растворители. Снижение их концентрации до допустимых значений является первостепенной задачей очистных сооружений [1].

Данная работа посвящена исследованию удельного потока растворителя и коэффициенту задержания при очистке металлосодержащих сточных вод производства печатных плат от ионов  $\text{Ni}^{2+}$ .

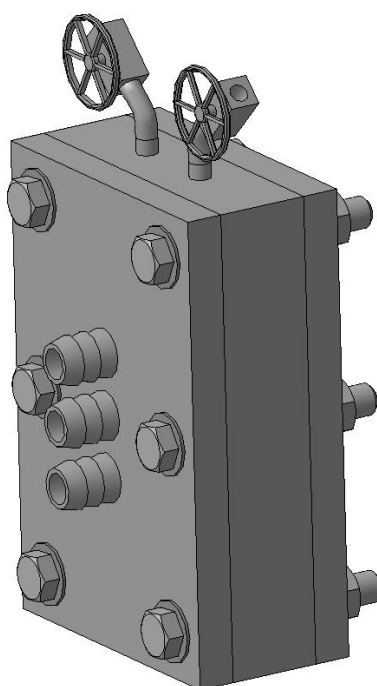
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Экспериментальные исследования были проведены на обратноосмотической установке с разделительной мембранной ячейкой плоскокамерного типа. Схема установки и 3D модель разделительной ячейки представлены на рисунках 1 и 2.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки:**

1 – расходная емкость; 2 – плунжерный насос; 3 – разделительная ячейка; 4 – дроссели;  
 5 – ротаметры; 6 – ресивер; 7 – компрессор; 8 – образцовый манометр;  
 9 – электроконтактный манометр; 10 – термостат; 11 – потенциометр; 12 – термометр;  
 13 – блок питания; 14 – емкость для получаемой жидкости; 15 – игольчатый вентиль.



**Рис. 2. 3D-модель разделительной ячейки**

Исследовалось влияние изменения давления на удельный поток растворителя и коэффициент задержания, а также на конечную концентрацию ионов  $\text{Ni}^{2+}$  при разделении исходного раствора с помощью мембран МГА-95 и ОПМН. Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, были проанализированы и применены в методике расчета удельного потока и коэффициента задержания.

Исследования проводились при следующих условиях: температура – 20 °С, рабочее давление – 2...3,5 МПа, исходная концентрация ионов  $\text{Ni}^{2+}$  – 75 мг/л, рабочая площадь мембраны – 0,0056 м<sup>2</sup>.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчет удельного потока растворителя проводился следующим образом [2, 3]:

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

где  $V_{\text{пер}}$  – объем полученного пермеата, м<sup>3</sup>;  $F_{\text{м}}$  – рабочая площадь мембраны, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – время проведения эксперимента, с.

Коэффициент задержания рассчитывался по формуле [2, 3]:

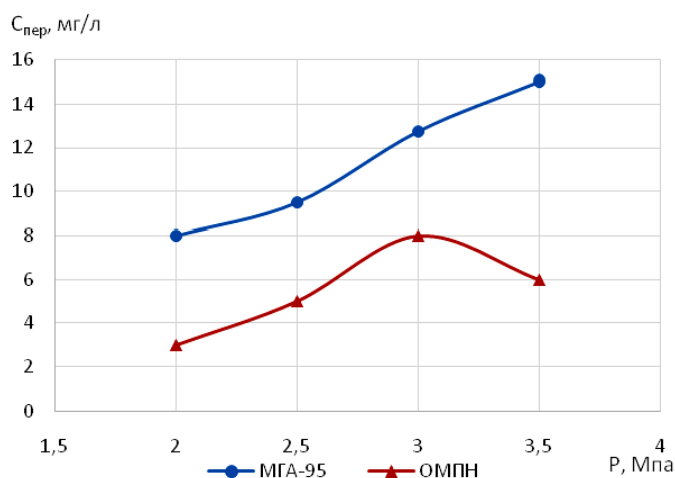
$$R = \left( 1 - \frac{C_{\text{пер}}}{C_{\text{исх}}} \right) \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $C_{\text{пер}}$  – концентрация растворенного вещества в пермеате, кг/м<sup>3</sup>;  $C_{\text{исх}}$  – концентрация растворенного вещества в исходном растворе, кг/м<sup>3</sup>.

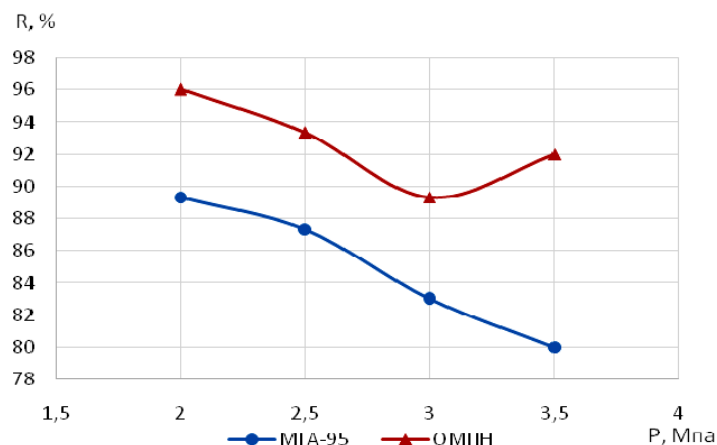
#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлена зависимость концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате от давления для мембран МГА-95 и ОМПН. Анализ данных показал, что для обеих мембран значения концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате увеличиваются при повышении рабочего давления, что свидетельствует об ухудшении качества очистки промышленных растворов производства печатных плат.

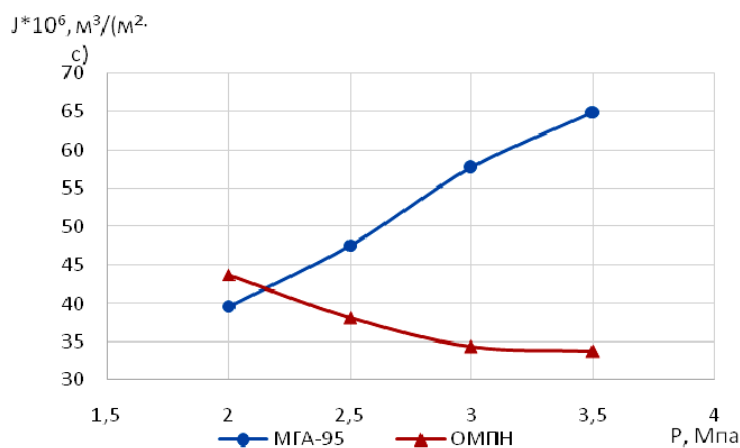
По результатам проведенных экспериментов и последующего расчета были получены зависимости коэффициента задержания и удельного потока растворителя от давления для исследуемых мембран, показанные на рис. 4 и 5. Обнаружено, что при повышении давления коэффициент задержания по  $\text{Ni}^{2+}$  понижается с ростом давления, что также подтверждает ухудшение качества очистки при повышении рабочего давления.



**Рис. 3. Зависимость концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате от давления для мембран МГА-95 и ОМПН**



**Рис. 4. Зависимость коэффициента задержания от давления для мембран МГА-95 и ОМПН**



**Рис. 5. Зависимость коэффициента задержания от давления для мембран МГА-95 и ОМПН**

Зависимости значений удельного потока растворителя от рабочего давления для мембран МГА-95 и ОМПН имеют отличные друг от друга тенденции, в отличие от показаний концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате и коэффициента задержания, где для обеих мембран значения росли и уменьшались соответственно. Так, для мембраны МГА-95 значения удельного потока растворителя повышаются с увеличением давления, а для мембраны ОМПН наоборот уменьшается. Вероятно, это связано с различием строения матрицы мембран, пористой структуры активного слоя мембран, а также видом взаимодействия с ним растворенного вещества.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенное исследование кинетических характеристик мембран МГА-95 и ОМПН при обратноосмотическом разделении промышленных растворов производства печатных плат, содержащих ионы никеля, позволило установить зависимость удельного потока растворителя, коэффициента задержания и концентрации ионов  $\text{Ni}^{2+}$  в пермеате от давления.

2. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о лучшем разделении никельсодержащих растворов с помощью мембраны ОМПН по сравнению с МГА-95, но худшей производительности. При этом наблюдается общая для обеих мембран тенденция к снижению качества разделения при увеличении давления.

#### *Список использованных источников*

1. Рязанов, А. В. Оценка воздействия предприятия, использующего гальванические технологии, на окружающую среду / А. В. Рязанов, Е. И. Уварова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, Вып. 6. – С. 2033 – 2036.

2. Дытнерский, Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей. – М. : Химия. 1975. – 252 с.

3. Акулинчев, А. М. Исследование кинетических коэффициентов обратноосмотического разделения слабоминерализованных растворов сточных вод / А. М. Акулинчев, О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, А. В. Краснова // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19, Вып. 3. – С. 941 – 943.

#### *References*

1. Ryazanov, A. V. Assessing the impact of enterprises using electroplating technology on the environment / A. V. Ryazanov, E. I. Uvarov // Bulletin of Tambov universities. Series: Natural and technical Sciences. – 2014. – V. 19. – Issue 6. – P. 2033 – 2036.

2. Dytnerskiy, Yu. I. Membrannye protsessy razdeleniya zhidkikh smesei. – M. : Khimiya publ., 1975. – 252 p.

3. Akulinichev, A. M. Study of kinetic coefficients for the reverse osmosis separation of solutions with low mineralization of sewage / A. M. Akulinichev, O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, A. V. Krasnov // Vestnik Tambov University. Series: Natural and technical Sciences. – 2014. – V. 19, Issue 3. – P. 941 – 943.

УДК 626.811  
ББК 38.761

**Щербаков В. И., Аль-Амри З.**

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
(Россия, г. Воронеж)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ОПРЕСНЕННОЙ ВОДЫ ДЛЯ ПИТЬЕВЫХ НУЖД (В УСЛОВИЯХ ИРАКА)**

**Shcherbakov V. I., Al-Amry Z.**

Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering  
(Russia, Voronezh)

## **RESEARCH CONDITIONING METHODS DESALINATED WATER FOR DRINKING (IN TERMS OF IRAQ)**

*Аннотация.* К категории некондиционных относятся воды, микроминеральный состав которых отличается от естественного фона питьевой воды, благоприятного для человека. Это воды, опресненные методами термической дистилляции, электродиализа, ионного обмена, обратного осмоса. Проблема улучшения качества некондиционированных вод в постановке сочетания технических достижений и современных санитарно-гигиенических и экологических критериев является комплексной. Подготовку питьевой воды осуществляют из пермеата II-ой ступени путем его фильтрационного обогащения гидрокарбонатом кальция с последующим кондиционированием в соответствии с санитарными требованиями.

*Ключевые слова:* ракушечник, имитат пермеат, мембранная очистка.

*Abstract.* For substandard category includes water, trace mineral composition of which differs from the natural background of drinking water, the favorable to humans. This water freshened thermal distillation methods, electrodialysis, ion exchange, reverse osmosis. The problem of improvement of quality water in the production of unconditioned combination technical achievements and modern sanitary and environmental criteria is a complex. Of preparation of potable water carried from the permeate II-nd stage of filtration by its beneficiation of calcium hydrogen carbonate, followed by conditioning in accordance with sanitary requirements.

*Keywords:* coquina, mimics permeate, membrane cleaning

Приготовление питьевой воды из пермеата морской воды является альтернативой существующей технологии водоподготовки в Ираке на основе промышленного дистиллята опреснительных дистилляционных установок, эксплуатирующихся в ряде приморских городов в районе Персидского залива [0].

Предусматривается предварительная подготовка морской воды. В связи с наличием в морской воде биологически активного компонента – бора и отсутствием в настоящее время селективных мембран для его удаления опреснение ведут в две ступени с подще-

лачиванием пермеата I-й ступени до pH = 10. Подготовку питьевой воды осуществляют из пермеата II-й ступени путем его фильтрационного обогащения гидрокарбонатом кальция с последующим кондиционированием в соответствии с СанПиН. Согласно изложенному, проведены эксперименты по оценке эффективности обогащения имитата пермеата II-й ступени с применением минеральной кислоты и кальций-карбонатной загрузки [2, 3].

Целью экспериментальных исследований являлось:

- получение рабочего графика зависимости выходной концентрации кальций-иона от дозы серной кислоты, внесенной в опресненную воду, фильтруемую через загрузку ракушечника;
- определение параметров кондиционирования опресненной воды, обогащенной гидрокарбонатом кальция, до питьевого качества в соответствии с СанПиН 2.1.4.1074–01 [4, 5].

Эксперименты по обогащению имитата пермеата  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  проводились на модели фильтра из оргстекла с внутренним диаметром 30 мм, где высота слоя загрузки фильтра – гранулированного ракушечника (табл. 1) 875 мм, крупность загрузки 0,5...3,0 мм (выделено из дисперсного природного материала с помощью стандартных сит), скорость фильтрования 7,5 м/ч, время контакта в загрузке – 7 мин.

Перед экспериментами в динамических условиях загрузку ракушечника взрыхляли обратным током дистиллята с объемным расширением 30...35% в течение 3 – 5 мин. В имитаты вносили различные дозы серной кислоты, согласовывая их со значениями экспериментально определенной кислотности среды. После вытеснения объема дистиллята из свободного и межзернового пространства фильтра в процессе фильтрования производили отбор проб фильтрата через каждые 10 мин.

Перед экспериментами в динамических условиях загрузку ракушечника взрыхляли обратным током дистиллята с объемным расширением 30...35% в течение 3 – 5 мин. В имитаты вносили различные дозы серной кислоты, согласовывая их со значениями экспериментально определенной кислотности среды. После вытеснения объема дистиллята из свободного и межзернового пространства фильтра в процессе фильтрования производили отбор проб фильтрата через каждые 10 мин.

### 1. Характеристика природного ракушечника

| Показатель                           | Величина показателя |
|--------------------------------------|---------------------|
| Крупность, мм                        | 0,5...5             |
| Эквивалентный диаметр, мм            | 1,52                |
| Коэффициент неоднородности, отн. ед. | 4,33                |
| Порозность загрузки, отн. ед.        | 0,47                |
| Насыпной вес, т/м <sup>3</sup>       | 1,8                 |

В пробах определяли следующие показатели: рН, щелочность общую, жесткость общую, катионы жесткости – кальций, магний, сульфаты, хлориды, сухой остаток.

Проводилось определение параметров коррекционной обработки обогащенной гидрокарбонатом кальция опресненной воды по схеме: фторирование + обеззараживание + стабилизация, а физико-химический состав питьевой опресненной воды производили расчетным путем.

Результаты экспериментальных исследований и расчетные характеристики состава питьевой воды приведены в табл. 2, 3 и на рис. 1.

## 2. Результаты фильтрационного обогащения опресненной воды гидрокарбонатом кальция при дозировании серной кислоты

| Показатели                                                                        | Опыт 1    |                                                         |               | Опыт 2    |                                                         |               | Опыт 3    |                                                         |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------|---------------|-----------|---------------------------------------------------------|---------------|-----------|---------------------------------------------------------|---------------|
|                                                                                   | дистиллят |                                                         | *<br>фильтрат | дистиллят |                                                         | *<br>фильтрат | дистиллят |                                                         | *<br>фильтрат |
|                                                                                   | исх.      | 37 мг/дм <sup>3</sup><br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |               | исх.      | 58 мг/дм <sup>3</sup><br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |               | исх.      | 39 мг/дм <sup>3</sup><br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |               |
| <i>t</i> , °С                                                                     | 22        | 22                                                      | 22            | 21,5      | 21,5                                                    | 21,5          | 20        | 20                                                      | 20            |
| рН, ед. рН                                                                        | 7,60      | 3,85                                                    | 7,95          | 5,95      | 3,0                                                     | 7,60          | 5,30      | 3,10                                                    | 7,75          |
| Що, мг-экв/дм <sup>3</sup>                                                        | 0,1       | –                                                       | 0,80          | 0,1       | –                                                       | 1,25          | 0,1       | –                                                       | 1,15          |
| Жо, мг-экв/дм <sup>3</sup>                                                        | –         | –                                                       | 1,40          | –         | –                                                       | 2,30          | –         | –                                                       | 1,85          |
| Жк, мг-экв/дм <sup>3</sup>                                                        | –         | –                                                       | 0,80          | –         | –                                                       | 1,25          | –         | –                                                       | 1,15          |
| Жп, мг-экв/дм <sup>3</sup>                                                        | –         | –                                                       | 0,60          | –         | –                                                       | 1,05          | –         | –                                                       | 0,70          |
| Кислотность,<br>мг-экв/дм <sup>3</sup>                                            | 0,02      | 0,68                                                    | –             | 0,10      | 1,05                                                    |               | 0,20      | 0,85                                                    | –             |
| Ca <sup>2+</sup> , мг-экв/дм <sup>3</sup> ,<br>мг/дм <sup>3</sup>                 | –         | –                                                       | 1,35          | –         | –                                                       | 2,25          | –         | –                                                       | 1,80          |
|                                                                                   | –         | –                                                       | 27,1          | –         | –                                                       | 45,1          | –         | –                                                       | 36,1          |
| Mg <sup>2+</sup> , мг-экв/дм <sup>3</sup> ,<br>мг/дм <sup>3</sup>                 | –         | –                                                       | 0,05          | –         | –                                                       | 0,05          | –         | –                                                       | 0,05          |
|                                                                                   | –         | –                                                       | 0,6           | –         | –                                                       | 0,6           | –         | –                                                       | 0,6           |
| Na <sup>++</sup> K <sup>+</sup> , мг-<br>экв/дм <sup>3</sup> , мг/дм <sup>3</sup> | –         | –                                                       | 0,16          | –         | –                                                       | 0,13          | –         | –                                                       | 0,1           |
|                                                                                   | –         | –                                                       | 7,8           | –         | –                                                       | 3,0           | –         | –                                                       | 2,3           |
| SO <sub>4</sub> <sup>2–</sup> , мг-экв/дм <sup>3</sup> ,<br>мг/дм <sup>3</sup>    | –         | 0,76                                                    | 0,76          | –         | 1,18                                                    | 1,18          | –         | 0,80                                                    | 0,80          |
|                                                                                   | –         | 37,2                                                    | 37,2          | –         | 57,8                                                    | 57,8          | –         | 39,2                                                    | 39,2          |
| HCO <sub>3</sub> <sup>–</sup> , мг/дм <sup>3</sup>                                | –         | –                                                       | 48,8          | –         | –                                                       | 76,3          | –         | –                                                       | 70,2          |
| Σ ионов, мг/дм <sup>3</sup>                                                       | –         | –                                                       | 122           | –         | –                                                       | 183           | –         | –                                                       | 149           |
| Сухой остаток,<br>мг/дм <sup>3</sup>                                              | –         | –                                                       | 98            | –         | –                                                       | 145           | –         | –                                                       | 114           |

\* фильтрат после ракушечника (τ<sub>конт</sub> = 7 мин)

### 3. Результаты обогащения $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ имитата пермеата II-й ступени при подкислении серной кислотой

| Показатель                                          | Исходный дистиллят | Имитат пермеата II-й ступени | Подкисление имитата дозами $\text{H}_2\text{SO}_4$ , мг-экв/дм <sup>3</sup> |                                             |                                             |                                           | Фильтрат 2 при подкислении имитата дозой $\text{H}_2\text{SO}_4$ |                         |
|-----------------------------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                                                     |                    |                              | 0,265<br>(13 мг/дм <sup>3</sup> )                                           | 0,265 + 0,402<br>(32,7 мг/дм <sup>3</sup> ) | 0,667 + 0,402<br>(52,4 мг/дм <sup>3</sup> ) | 1,067 + 0,4<br>(71,9 мг/дм <sup>3</sup> ) | 32,7 мг/дм <sup>3</sup>                                          | 71,9 мг/дм <sup>3</sup> |
| Температура $t$ , °C                                | –                  | 15                           | 17                                                                          | 17                                          | 17                                          | 17                                        | 17                                                               | 17                      |
| Водородный показатель pH                            | 5,3                | 9,6                          | 9,3                                                                         | 7,3                                         | 4,6                                         | 3,5                                       | 8,4                                                              | 7,8                     |
| Щелочность общая Що, мг-экв/дм <sup>3</sup>         | 0,05               | 0,45                         | 0,40                                                                        | –                                           | –                                           | –                                         | 0,72                                                             | 0,92                    |
| Жесткость общая Жо, мг-экв/дм <sup>3</sup>          | 0,02               | 0,02                         | 0,02                                                                        | 0,02                                        | 0,02                                        | 0,02                                      | 0,72                                                             | 1,24                    |
| Диоксид углерода $\text{CO}_2$ , мг/дм <sup>3</sup> | 8,8                | –                            | –                                                                           | –                                           | –                                           | –                                         | –                                                                | –                       |
| Хлориды $\text{Cl}^-$ , мг/дм <sup>3</sup>          | 25,5               | –                            | –                                                                           | –                                           | –                                           | –                                         | 25,5                                                             | –                       |
| Кислотность, мг-экв/дм <sup>3</sup>                 | –                  | –                            | –                                                                           | –                                           | 0,25                                        | 0,55                                      | –                                                                | –                       |

Примечание: 1) в исходный дистиллят ( $V = 20$  дм<sup>3</sup>) добавлено 6,41 мл 1N раствора NaOH и 854,6 мг NaCl с целью имитации пермеата II-й ступени ООУ при опреснении морской воды; 2) загрузка фильтра – ракушечник  $d_3 - 0,5 \dots 3$  мм,  $v_\phi = 7,1$  м/ч.

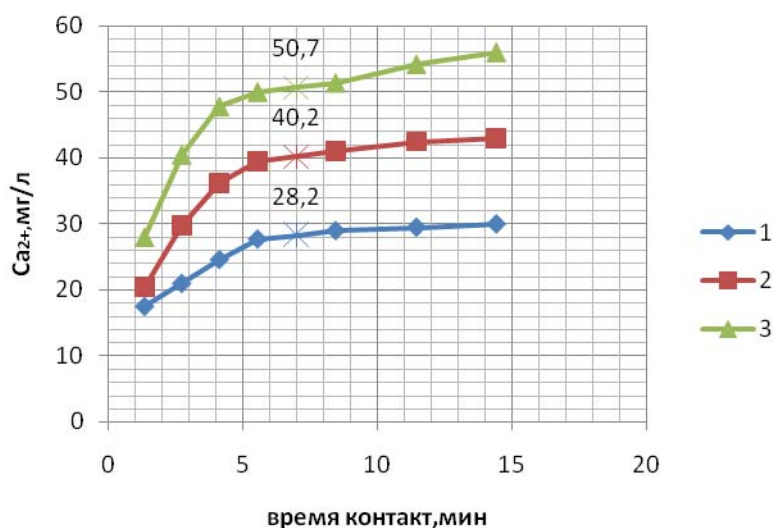


Рис. 1. График зависимости  $C_{\text{Ca}} = f(\tau_{\text{конт}})$  при обогащении опресненной воды ионами кальция с предварительным подкислением серной кислотой:

1 – кислотность 0,69 мг-экв/л; 2 – кислотность 0,95 мг-экв/л; 3 – кислотность 1,22 мг-экв/л;

\* Контрольные точки  $C_{\text{Ca}} = f(D_{\text{H}_2\text{SO}_4})$

Дозирование серной кислоты в дистиллят в количестве 37...58 мг/дм<sup>3</sup> дает прирост по кальций-иону от 27 до 45 мг/дм<sup>3</sup>. Общее солесодержание при этом составляет 122...183 мг/дм<sup>3</sup>, что превышает минимально необходимую минерализацию 100 мг/дм<sup>3</sup>, согласно санитарно-гигиеническому критерию, принятому ВОЗ.

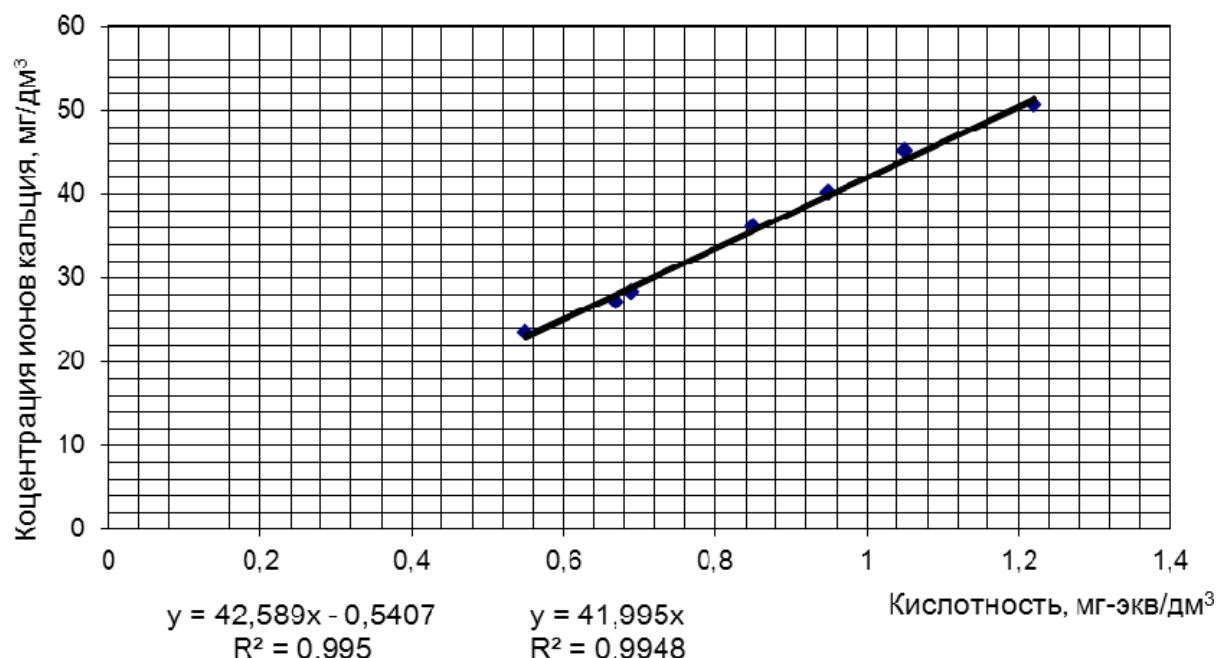
Для опресненной питьевой воды установлены оптимальные пределы минерализации для полуаридных зон:

- для сульфатно-хлоридного класса – 200...400 мг/дм<sup>3</sup>;
- для гидрокарбонатного класса – 250...500 мг/дм<sup>3</sup>.

На рисунке 3 представлена интегральная зависимость концентрации иона кальция от дозы кислоты при обогащении опресненной воды гидрокарбонатом кальция фильтрационным методом с применением ракушечника при времени контакта с загрузкой ~7 мин. По оси абсцисс даны значения общей кислотности воды после дозирования H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> с учетом компенсации возможной карбонатной щелочности воды и выделения при этом диоксида углерода.

Полученные зависимости дают возможность определения дозы кислоты для прогнозируемых величин – концентрации кальция и минерализации опресненной воды.

**Выводы.** Подготовку питьевой воды из пермеата II-й ступени (рН = 10) целесообразно осуществлять путем его фильтрационного обогащения гидрокарбонатом кальция с последующим кондиционированием в соответствии со стандартами качества на питьевую воду. Эксперименты по оценке эффективности фильтрационного обогащения имитата пермеата II-й ступени проведены с применением минеральной кислоты и кальций-карбонатной загрузки, что позволило получить хорошие результаты.



**Рис. 3. График зависимости концентрации ионов кальция от дозы серной кислоты (по кислотности) в процессе фильтрационного обогащения (время контакта – 7 мин, температура 20...22 °С)**

### *Список использованных источников*

1. Ивлева, Г. А. Антропогенное загрязнение подземных вод России и их очистка для питьевых нужд / Г. А. Ивлева, Л. С. Алексеев, З. Аль-Амри // науч.-техн. конф. в г. Бийске. – Апрель, 2012.
2. Щербаков, В. И. Методы фторирования воды городских водопроводов / В. И. Щербаков, З. С. А. Аль-Амри // материалы 8-й Межд. науч. практ. конф. ; красная Поляна, г. Сочи, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т. (НПИ). – Новочеркасск, 2014. – С. 56 – 59.
3. Алексеев, Л. С. Контроль качества воды : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : ИНФРА-М, 2009. – 159 с.
4. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества: СанПиН 2.1.4.1074-01. Утверждены гл. гос. сан.врачом РФ 26 сент. 2001 // Бюл. нормат. актов федер. органов исполн. власти. – 2001. – № 48. – С. 3 – 54.
5. Ивлева, Г. А. Использование пермеата обратноосмотической установки в технологии приготовления питьевой воды // Труды ин-та ВОДГЕО «Глубокая очистка воды из источников повышенной загрязненности». – 1991.

### *References*

1. Ivleva, G. A. The anthropogenic pollution of underground waters of Russia and purification for drinking / G. A. Ivleva, L. S. Alekseev, Z. Al-Amri. Scientific and Technical. conference in Biysk. – April, 2012.
2. Shcherbakov, V. I. Water fluoridation methods of urban water supply systems / V. I. Shcherbakov, Z. S. A. Al-Amri // Materials 8<sup>th</sup> Int. scientific. Pract. conf. ; Red Polyana, Sochi, Yuzh. Ros. state. Polytechnic. Univ. (NPI). – Novocherkassk, 2014. – P. 56 – 59.
3. Alekseyev, L. S. Water quality control : Textbook. – 4<sup>th</sup> ed., rev. and ext. – M. : INFRA-M, 2009. – 159 p.
4. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality Control: SanPiN 2.1.4.1074-01. approved by the Chapter. state. san. doctor of the Russian Federation 26 September. 2001 // Bul. Normat. fader acts. executing agencies. authorities. – 2001. – N 48. – P. 3 – 54.
5. Ivleva, G. A. Using reverse osmosis permeate installation in drinking water preparation technology // Proceedings of Inst VODGEO “Deep cleaning water from the increased sources of pollution”. – 1991.

Доровских Д. В.<sup>1</sup>, Таджил Рахман Шати Таджил<sup>1</sup>, Чернецов Д. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов),

<sup>2</sup>Тамбовский политехнический техникум им. М. С. Солнцева  
(Россия, г. Тамбов)

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Dorovskikh D. V.<sup>1</sup>, Tadzhih Rahman Shati Tadzhih<sup>1</sup>, Chernecov D. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov),

<sup>2</sup>Tambov Polytechnic College name M.S. Solntsev  
(Russia, c. Tambov)

## ADVANCED EXHAUST GAS TREATMENT SYSTEM OF DIESEL ENGINE VEHICLES

*Аннотация.* Очистка отработавших газов дизельных двигателей является важнейшей задачей современной науки и направлена на минимизацию вредного воздействия автомобильного транспорта на окружающую среду.

*Ключевые слова:* двигатель, дизель, отработавшие газы, очистка.

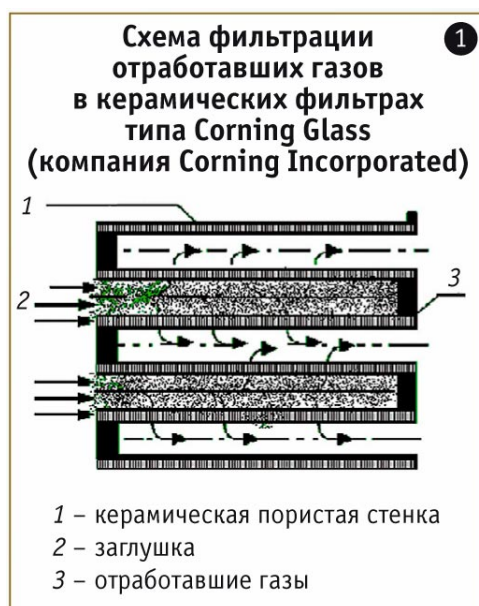
*Abstract.* Cleaning the exhaust gases of diesel engines is the major problem of modern science, and is aimed at minimizing the harmful effects of road transport on the environment.

*Keywords:* engine, diesel engine, exhaust gas, cleaning.

В последние годы все большее распространение получают дизельные фильтры и фильтры-нейтрализаторы, объединяющие функции фильтра и нейтрализатора. В западной практике такие устройства начинают применять в больших масштабах как на легковых автомобилях, так и на грузовых и на автобусах. При разработке фильтра для улавливания дисперсных частиц (иногда именуемого сажевым фильтром) необходимо решить две весьма сложные задачи:

- фильтрацию потока нагретых газов с частицами размером от 200 нм до 10 мкм;
- периодическое или непрерывное удаление накопленных частиц (регенерацию сажевого фильтра).

Известны попытки использовать для удаления дисперсных частиц электрофильтры, жидкостные уловители, дожигание в потоке путем высокочастотного нагрева, использовать плазму и проч. Пока практически применяют, и то в ограниченных масштабах, лишь фильтрацию дизельных ОГ с периодической или непрерывной регенерацией. Наибольшее распространение получили керамические структуры складчатого типа, впервые предложенные фирмой Corning Incorporated [1]. У такой структуры (рис. 1) максимальная фильтрующая поверхность в единице объема (в пределах 1...3 м<sup>2</sup>/дм<sup>3</sup>), а отсутствие подвижных элементов обеспечивает ее длительную работоспособность.



**Рис. 1. Схема фильтрации**

Технологии изготовления таких фильтроэлементов позволяют в широких пределах варьировать размеры и длину каналов, общую пористость и размер пор, базовый материал (кордиерит, оксид алюминия, карбид кремния и др.) и некоторые другие параметры. При общей пористости свыше 50%, размерах сквозных пор 10...30 мкм, толщине стенки около 0,5 мм общий объем фильтровального блока для дизеля должен быть близок к рабочему объему его цилиндров. В этом случае возможно добиться гидравлического сопротивления незагрязненного фильтра на уровне 150...200 мм вод. ст. при приемлемых габаритах. По мере работы сопротивление фильтра возрастает из-за загрязнения.

Продолжительность работы до достижения критического сопротивления (обычно 700...1000 мм вод. ст.) зависит от концентрации дисперсных частиц в отработавших газах, размеров и характеристик фильтра, содержания серы в топливе и некоторых других факторов, но обычно не превышает нескольких часов, после чего фильтр необходимо регенерировать [1].

Процесс регенерации заключается в окислении накопленных дисперсных частиц и освобождении фильтрующей поверхности. Практическое применение получили три схемы регенерации:

- термическая, заключающаяся в искусственном разогреве ОГ до температуры интенсивного окисления дисперсных частиц кислородом 650...700 °С;
- введение присадок в дизельное топливо, снижающих температуру окисления дисперсных частиц до средних температур выхлопа 300...400 °С;
- использование диоксида азота, получаемого каталитическим окислением NO, содержащегося в ОГ.

Термическая схема реализуется в виде установки перед фильтром специальных горелок, включающихся при достижении критического значения гидравлического сопротивления фильтра. Известны и другие схемы нагрева ОГ до температуры, при которой происходит интенсивное окисление накопленной сажи. Например, хорошие результаты

достигнуты при каталитическом разогреве ОГ за счет окисления паров дизельного топлива, подаваемого на установленный перед фильтром катализатор. В некоторых случаях вместо топлива применяют природный или сжиженный газ. Известен и положительный опыт электрического разогрева ОГ.

Добавка в дизельное топливо присадок: металлоорганических соединений железа, марганца и др. – сопровождается снижением температуры сжигания дисперсных частиц за счет каталитического эффекта, достигаемого при введении активного металла или его соединений в объем дисперсной частицы. Недостатком метода является накопление на фильтре продуктов окисления присадок – оксидов железа, марганца и др., что несколько повышает сопротивление фильтра и требует его периодической очистки.

Наибольшее распространение в последние годы получила схема низкотемпературного (300...400 °С) окисления дисперсных частиц с помощью диоксида азота. Диоксид азота, получаемый при каталитическом окислении содержащегося в ОГ монооксида азота ( $2\text{NO} + \text{O}_2 = 2\text{NO}_2$ ), обладает более высокой, чем кислород воздуха, способностью окислять дисперсные частицы. Это позволяет добиться устойчивой регенерации фильтра при температурах до 400 °С, т.е. при обычных температурах ОГ дизеля. Важно отметить, что продуктом взаимодействия диоксида азота с углеродом является NO ( $2\text{NO}_2 + \text{C} = 2\text{NO} + \text{CO}_2$ ), т.е. монооксид является лишь носителем активного кислорода и в процессе регенерации не расходуется.

Выбор схемы регенерации обусловлен конструкцией и состоянием дизельного двигателя, требованиями по очистке (экологическими стандартами), качеством топлива, экономическими критериями и рядом других условий, связанных с надежной и безопасной эксплуатацией сажевого фильтра. Так, термические методы, как правило, сопряжены с дополнительным (до 10%) расходом топлива и пожароопасностью из-за практически неуправляемого горения накопленной сажи. Добавки присадок в топливо помимо очевидных проблем с приготовлением, хранением и заправкой имеют определенные ограничения и по появлению в ОГ дополнительных дисперсных частиц (оксидов железа, марганца и проч.), которые становятся дополнительной нагрузкой на фильтр и нуждаются в утилизации [2].

От этих недостатков в значительной мере свободен метод каталитической ( $\text{NO}_2$ ) регенерации. Конструктивно каталитическая схема регенерации удачно реализуется в фильтрах-нейтрализаторах (рис. 2), где стоящий перед фильтровальным блоком (поз. 2) катализатор (поз. 1) не только окисляет СО и HC, но и генерирует  $\text{NO}_2$ , необходимый для регенерации накопленных на фильтре дисперсных частиц. Функции каталитического окисления, включая генерирование диоксида азота, и функцию фильтрации может выполнять и фильтровальный блок, на поверхность которого нанесен каталитический слой.

Принято считать, что регенерация с помощью  $\text{NO}_2$  устойчиво протекает в том случае, если количество диоксида азота в 8...10 раз превышает содержание дисперсных частиц. В этом плане мероприятия по сокращению выбросов  $\text{NO}_x$ , например, за счет совершенствования рабочего процесса ограничивают применимость метода каталитической регенерации на двигателях с низким исходным выбросом дисперсных частиц.

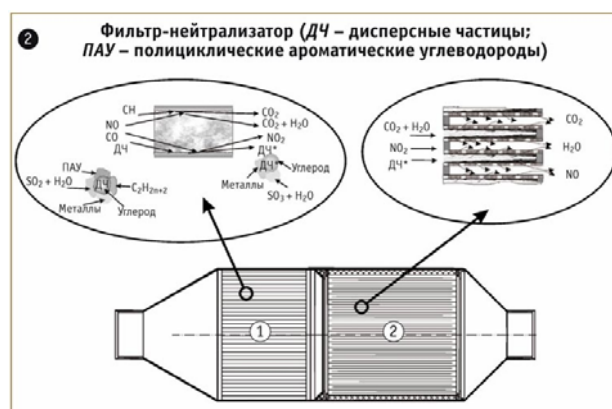


Рис. 2. Схема фильтра-нейтрализатора

Поэтому все шире применяют комбинированные схемы регенерации. В значительной мере решение подобных задач облегчает электронизация системы топливоподачи дизеля (наличие системы Common Rail).

Стандарты Euro5 и выше для дизелей требуют совместного использования обоих перечисленных выше методов обезвреживания токсичных компонентов, которое может рассматриваться как система комплексной, или четырехкомпонентной, очистки отработавших газов дизелей. В этом случае в выпускной системе дизеля последовательно устанавливают окислительный нейтрализатор и фильтр (фильтр-нейтрализатор), систему восстановления оксидов азота и систему финишной очистки, а также системы электронного управления этими агрегатами. Структура таких систем приведена на рис. 3 [3], но их широкое внедрение пока сдерживается недостаточной надежностью, довольно большими габаритными размерами и весьма внушительными затратами.

Отметим, что все процессы по каталитическому обезвреживанию токсичных компонентов, и особенно  $\text{NO}_x$ , весьма чувствительны к содержанию серы в топливе. При каталитическом окислении диоксида серы до триоксида последний взаимодействует с активным компонентом катализатора и/или с материалом носителя (окислительный нейтрализатор), либо с катализатором восстановительного нейтрализатора (SCR-процесс), либо с фазой основного адсорбента – оксидом или карбонатом бария (технология  $\text{NO}_x$ -адсорбер). Поэтому по мере ужесточения экологических стандартов возрастают и требования по содержанию серы в топливе. Например, чтобы обеспечить соответствие стандарту уровня Euro5, содержание серы в топливе не должно превышать 10 ppm.

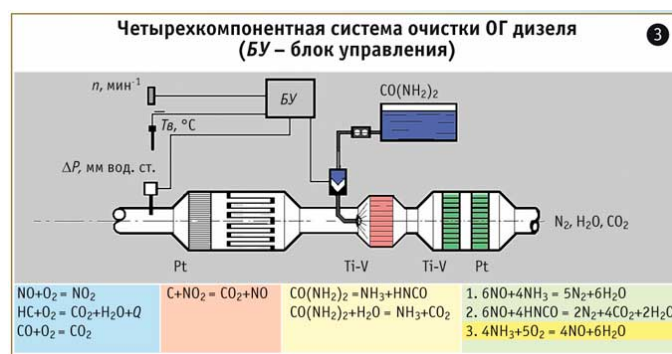


Рис. 3. Схема четырехкомпонентной очистки ОГ дизеля

**Выводы.** Требования Специального технического регламента «О требованиях к выбросам автомобильной техникой, выпускаемой в обращение на территории РФ, вредных (загрязняющих) веществ» могут быть обеспечены лишь с использованием систем очистки ОГ от токсичных компонентов, образование которых не удастся предотвратить путем совершенствования рабочего процесса и/или использования высококачественного или альтернативных видов топлива.

Применительно к дизелям наибольшие проблемы при выполнении экологических стандартов создают дисперсные частицы и оксиды азота, для удаления которых целесообразно использовать фильтрацию ОГ с целью удаления дисперсных частиц и селективное каталитическое восстановление оксидов азота. Необходимость в раздельном или объединенном использовании этих методов обусловлена исходной эмиссией дизеля и требованиями экологического регламента.

При фильтрации ОГ дизеля целесообразно использовать керамические фильтры складчатого типа. Наиболее предпочтительным и экономически оправданным методом периодической или непрерывной регенерации таких фильтров от накапливаемых дисперсных частиц является их окисление диоксидом азота, генерируемым с помощью окислительного каталитического нейтрализатора, который обеспечивает и снижение СО и НС.

Для нейтрализации оксидов азота наиболее предпочтительным методом является селективное восстановление аминогруппами, в частности, продуктами разложения мочевины.

Для обеспечения требований, предъявляемых к дизелям стандарта Euro5, потребуется совместное применение окислительного и восстановительного нейтрализаторов и фильтра с каталитической системой регенерации.

#### *Список использованных источников*

1. Васильев, И. П. Повышение эффективности очистки отработавших газов дизелей // Двигатели внутреннего сгорания. – М., 2014. – № 1 – С. 84 – 88.
2. Марченко, А. П. Токсичность отработавших газов дизеля при использовании топлива растительного происхождения / А. П. Марченко, А. П. Строков, А. Ф. Минак, А. А. Осетров, О. Ю. Линьков // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков : Харьковский Политехнический Институт. – 2002. – № 1. – С. 22 – 25.
3. Holy, G. Improved Catalyst System for SULEV Legislation First Practical Experience / G. Holy, R. Bruck, P. Hirth // SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan (CoboCentr), March 6 – 9, 2000 : SAE Technical paper № 2000-01-0500, 2000. – P. 7.

#### *References*

1. Vasilev, I. P. Increasing the exhaust gas purification efficiency of diesel engines // Internal combustion engines, M., 2014. – N 1 – P. 84 – 88.
2. Marchenko, A. P. The toxicity of the exhaust gas of a diesel engine using fuels of vegetable / A. P. Marchenko, A. P. Strokov, A. F. Minak, A. A. Osetrov, O. Yu. Linkov // Internal combustion engines. – Kharkov : Kharkov Polytechnical Institute. – 2002. – N 1. – P. 22 – 25.
3. Holy, G. Improved Catalyst System for SULEV Legislation First Practical Experience / G. Holy, R. Bruck, P. Hirth // SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan (CoboCentr), March 6 – 9, 2000 : SAE Technical paper № 2000-01-0500, 2000. – P. 7.

УДК 691.175  
ББК Н38.36

**Загородникова М. А., Ярцев В. П., Максимова А. А.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ПВХ-МЕМБРАН В КОНСТРУКЦИЯХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА**

**Zagorodnikova M. A., Yartsev V. P., Maksimova A. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**CHEMICAL RESISTANCE AND ECOLOGICAL SAFETY  
OF PVC-MEMBRANES THAT USE IN THE CONSTRUCTION  
OF TREATMENT PLANTS FOR AGROINDUSTRIAL COMPLEX**

*Аннотация.* Исследована химическая стойкость ПВХ-мембран к веществам, содержащимся в отходах животноводческих комплексов. Установлены зависимости, показывающие характер влияния компонентов отходов животноводства на структуру поливинилхлорида.

*Ключевые слова:* поливинилхлорид, гидроизоляционные мембраны, долговечность, химическая стойкость, агрессивные среды.

*Abstract.* This paper presents study result of the chemical resistance for PVC-membranes to the substances contained in the waste of livestock. The paper presents the dependencies, showing the effect of the chemical components of animal waste in the PVC structure.

*Keywords:* polyvinylchloride, waterproofing membranes, durability, chemical resistance, aggressive influence.

В сфере агропромышленного комплекса мембраны на основе поливинилхлорида могут применяться в качестве гидроизоляции при строительстве накопителей отходов животноводческих хозяйств. Целесообразность устройства данных конструкций и их экологическая безопасность обоснована высокими эксплуатационными характеристиками ПВХ-мембран: химической и биостойкостью, прочностью, долговечностью, водонепроницаемостью. При условии профессионального монтажа пленочной лагуны полностью исключается попадание навоза на землю и загрязнение прилегающих территорий, что обеспечивает экологическую безопасность грунтового основания конструкции.

Установлено [1], что поливинилхлорид устойчив к действию кислот, щелочей, солей, нефтепродуктов, органических растворителей, благодаря чему он широко применяется в химической промышленности для изоляции трубопроводов, облицовки химических аппаратов, цистерн и резервуаров.

Однако, при применении ПВХ-мембран в конструкциях животноводческих комплексов, в материале под влиянием агрессивных сред могут протекать реакции, приводящие к изменению окраски полимера, ухудшению физико-механических и других эксплуатационных свойств [2]. Поэтому при проектировании конструкций пленочных навозохранилищ необходимо учитывать характер влияния агрессивных веществ, содержащихся в отходах животноводческих комплексов, на работоспособность ПВХ-мембран.

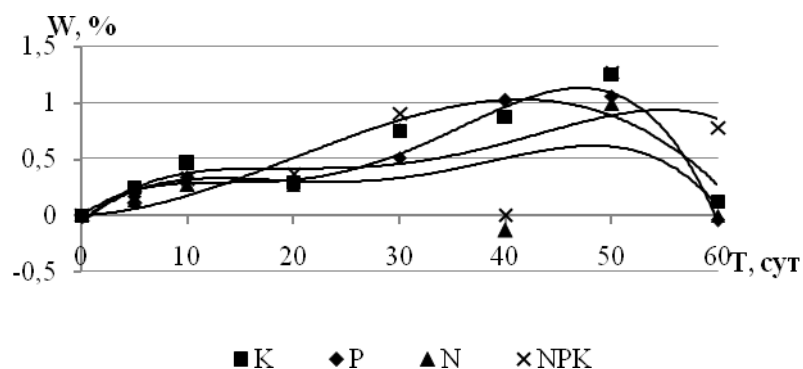
Был проведен ряд лабораторных исследований физико-механических свойств семи видов ПВХ-мембран после воздействия на них агрессивных сред. В таблице 1 приведены основные характеристики исследуемых материалов.

Образцы мембран в течение 2-х месяцев замачивались в растворах неорганических удобрений, содержащих в высокой концентрации основные компоненты навоза (фосфор, калий и азот). Также проводились натурные испытания, где в качестве агрессивной среды был использован свежий свиной навоз (как наиболее агрессивный), разведенный в воде, в пропорции 1:2.

Для оценки степени поглощения ПВХ-мембранами растворов агрессивных сред образцы предварительно взвешивали с точностью до 0,01 г, затем помещали в емкости с растворами и через заданный интервал времени фиксировали изменение массы образцов. Полученные зависимости на примере ПВХ-мембраны № 1 (ПЛАСТФОИЛ® U 1.5), выдержанной в растворах неорганических удобрений, содержащих фосфор «Р», калий «К» и азот «N», а также их комбинацию «NPK», представлены на рис. 1.

### 1. Основные характеристики ПВХ-мембран ПЛАСТФОИЛ® и ЭКСТРАРУФ®

| № | Наименование материала | Толщина, мм | Вид армирования     | Применение                                                                   |
|---|------------------------|-------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | ПЛАСТФОИЛ® U 1.5       | 1,5         | Без армирования     | Гидроизоляция фундаментов зданий и сооружений, мостов, тоннелей, резервуаров |
| 2 | ПЛАСТФОИЛ® U 2.0       | 2           | Без армирования     |                                                                              |
| 3 | ПЛАСТФОИЛ® S NORD 1.5  | 1,5         | Без армирования     | Гидроизоляция кровли                                                         |
| 4 | ПЛАСТФОИЛ® F 1.5       | 1,5         | Синтетическая сетка | Гидроизоляция кровель с механическим креплением                              |
| 5 | ПЛАСТФОИЛ® F 1.2       | 1,2         | Синтетическая сетка |                                                                              |
| 6 | ЭКСТРАРУФ® F 1.2       | 1,2         | Синтетическая сетка | Гидроизоляция кровель производственных зданий, торговых комплексов           |
| 7 | ЭКСТРАРУФ® F 1.5       | 1,5         | Синтетическая сетка |                                                                              |



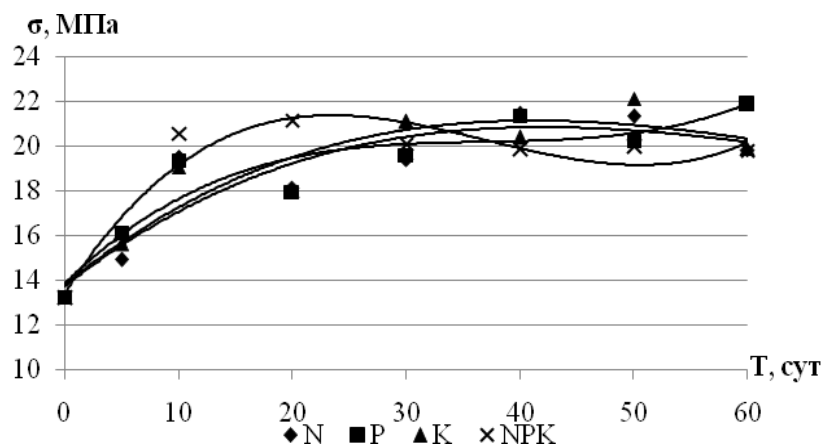
**Рис. 1. Зависимость поглощения агрессивных сред от длительности замачивания ПВХ-мембраны ПЛАСТФОИЛ®U 1.5**

Для всех видов ПВХ-мембран в течение первых 30 сут наблюдается плавное увеличение массы до 1...2%. Дальнейшее выдерживание образцов (от 30 до 60 сут) приводит к стабилизации или понижению массы, что свидетельствует о незначительных изменениях структуры полимера.

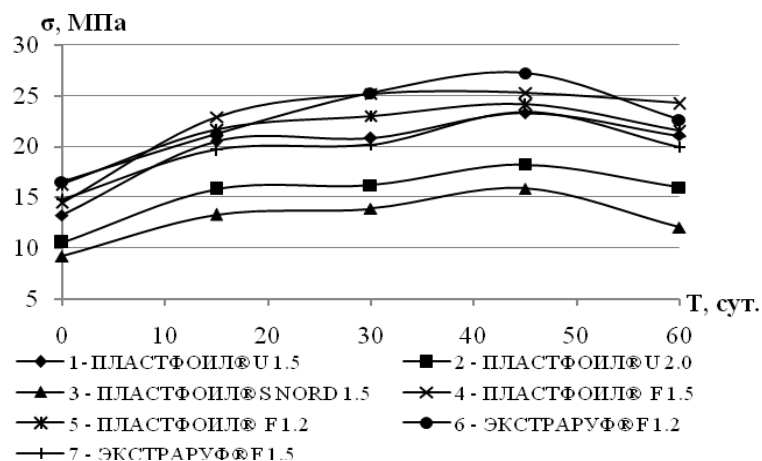
Прочность мембран рассчитывали по результатам кратковременных испытаний образцов на срез на установке рычажного типа. На рисунке 2 представлены полученные зависимости на примере неармированной ПВХ-мембраны ПЛАСТФОИЛ®U 1.5.

Для всех видов ПВХ-мембран наблюдается увеличение прочности при замачивании образцов до 20 сут в среднем на 30% вне зависимости от вида агрессивной среды. На этом этапе процесс упрочнения связан с повышением жесткости за счет ориентационных явлений в структуре полимера. При дальнейшем замачивании (от 20 до 60 сут) значение прочности стабилизируется, что особенно заметно для неармированных ПВХ-мембран.

Также были построены зависимости кратковременной прочности на срез от времени замачивания образцов ПВХ-мембран при натурных испытаниях. Полученные графики представлены на рис. 3.



**Рис. 2. Зависимость кратковременной прочности на срез от длительности замачивания ПВХ-мембраны ПЛАСТФОИЛ®U 1.5**



**Рис. 3. Зависимость кратковременной прочности на срез от длительности замачивания ПВХ-мембран при натурных испытаниях**

Из рисунка 3 видно, что для всех видов ПВХ-мембран наблюдается увеличение прочности материала при замачивании образцов до 45 сут, а затем небольшое снижение, в среднем на 10...15%. При этом значение прочности на 60 сут в целом остается выше, чем первоначальное.

Для оценки влияния агрессивных воздействий на долговечность ПВХ-мембран проводились длительные испытания. Так как для поливинилхлорида хорошо проявляется температурно-временная зависимость прочности [3, 4], прогнозирование долговечности ПВХ-мембран целесообразно проводить с позиции термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твердого тела [5].

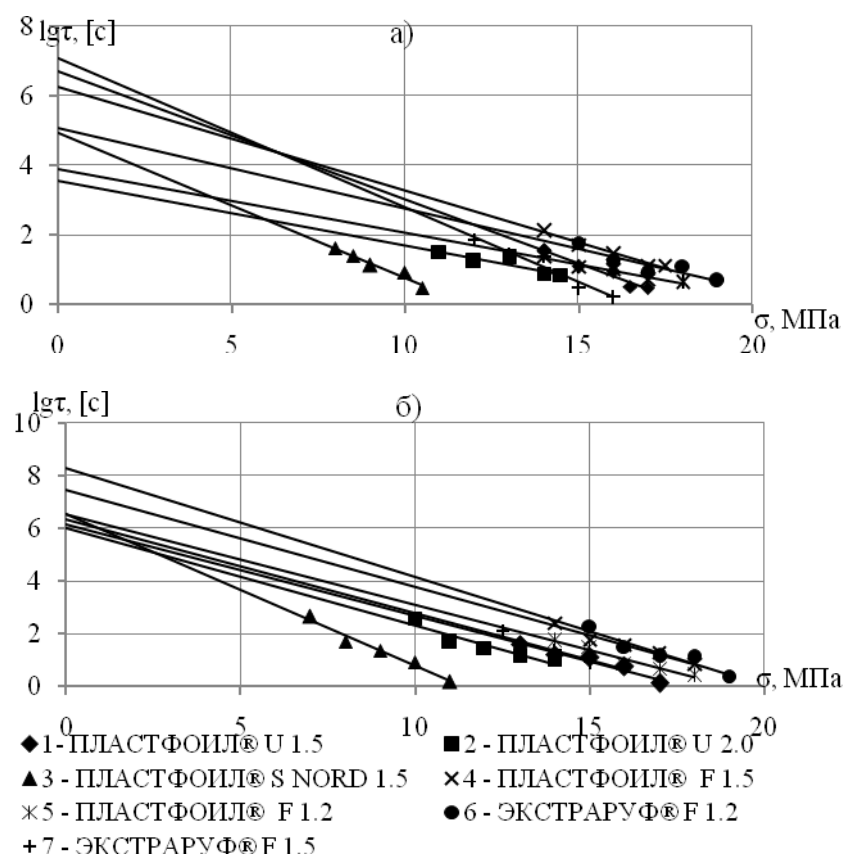
Полученные зависимости долговечности от напряжения при срезе образцов ПВХ-мембран после натурных испытаний представлены на рис. 4.

Из рисунка 4 видно, что для всех видов ПВХ-мембран воздействие агрессивной среды в течение 60 суток не приводит к снижению прочности и долговечности материала. Для мембран 1 и 7 угол наклона прямой долговечности не изменяется или уменьшается незначительно, для остальных образцов наблюдается увеличение угла наклона прямой, что свидетельствует об увеличении долговечности для данных экспериментальных условий.

В таблице 2 представлены данные, позволяющие сделать предварительную оценку долговечности ПВХ-мембран после воздействия агрессивной среды в течение 60 сут. Величина интервала  $\Delta l_{g4}$  определяется относительно  $l_{gt}$  и характеризует срок службы материала для данных условий эксплуатации.

Таким образом, выдерживание образцов в химических растворах неорганических удобрений не выявило увеличения массы насыщенных образцов по сравнению с сухими, что характеризует низкое водопоглощение материалов.

Результаты кратковременных и длительных испытаний на срез не показали снижения прочности и долговечности ПВХ-мембран при вымачивании их в растворах агрессивных сред. Следовательно, ПВХ-мембраны ПЛАСТФОИЛ® и ЭКСТРАРУФ® имеют достаточную химическую стойкость и могут применяться на предприятиях животноводческого комплекса. При этом прогнозируемые сроки эксплуатации в зависимости от состава мембран составляют от 12 до 35 лет.



**Рис. 4. Зависимость долговечности от напряжения при постоянной температуре для ПВХ-мембран:**

*a* – без внешних воздействий; *б* – после 60 ч выдерживания в агрессивной среде

## 2. Коэффициенты для оценки долговечности ПВХ-мембран, подверженных воздействию агрессивной среды

| № | Наименование<br>ПВХ-мембраны | Без воздействий |              | Натурные испытания, 60 суток |              |
|---|------------------------------|-----------------|--------------|------------------------------|--------------|
|   |                              | $\Delta \lg A$  | $\tau$ , лет | $\Delta \lg A$               | $\tau$ , лет |
| 1 | ПЛАСТФОИЛ® U 1.5             | 6,3...7,1       | 18...22      | 5,7...6,5                    | 13...19      |
| 2 | ПЛАСТФОИЛ® U 2.0             | 3,1...3,9       | 5...8        | 5,6...6,4                    | 12...19      |
| 3 | ПЛАСТФОИЛ® S NORD 1.5        | 4,9...5,4       | 7...10       | 6,1...6,9                    | 16...20      |
| 4 | ПЛАСТФОИЛ® F 1.5             | 5,9...6,7       | 15...19      | 7,1...7,8                    | 20...28      |
| 5 | ПЛАСТФОИЛ® F 1.2             | 3,7...4,5       | 6...10       | 6,2...6,8                    | 16...20      |
| 6 | ЭКСТРАРУФ® F 1.2             | 4,9...5,4       | 7...10       | 7,8...8,4                    | 27...35      |
| 7 | ЭКСТРАРУФ® F 1.5             | 6,1...6,7       | 16...19      | 6,7...7,4                    | 18...25      |

#### *Список использованных источников*

1. Ульянов В.М. Поливинилхлорид / В.М. Ульянов, Э.П. Рыбкин, А.Д. Гуткович, Г.А. Пишин. – М.: Химия, 1992, 288 с.
2. Мощанский, Н. А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред. – М. : Госстройиздат, 1962. – 235 с.
3. Загородникова, М. А. Прогнозирование долговечности гидроизоляционных кровельных мембран на основе поливинилхлорида / М. А. Загородникова, В. П. Ярцев // Academia. Архитектура и строительство. – 2015. – № 3. – С. 139 – 141.
4. Загородникова, М. А. Влияние факторов старения на долговечность поливинилхлоридных материалов / М. А. Загородникова, В. П. Ярцев // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2015. – № 2. – С. 13 – 18.
5. Ратнер, С. Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С. Б. Ратнер, В. П. Ярцев. – М. : Химия, 1992.

#### *References*

1. Ulyanov, V. M. Polyvinylchloride / V. M. Ulyanov, E. P. Rybkin, A. D. Gutkovich, G. A. Pishin. – M. : Chemistry, 1992. – 288 p.
2. Moshchanskiy N. A. Increased durability of building materials and construction, operating in aggressive environments. – M. : Gosstroyizdat, 1962. – 235 p.
3. Zagorodnikova, M. A. Durability prediction of waterproofing membrane roof on a polyvinylchloride basis / M. A. Zagorodnikova, V.P. Yartsev // Academia. Architecture and Construction. – 2015. – N 3. – P. 139 – 141.
4. Zagorodnikova, M. A. Influence of aging factors on polyvinylchloride material durability / M. A. Zagorodnikova, V.P. Yartsev // Scientific Bulletin of Voronezh State Architecture and Construction University. Series: Physical and chemical problems and high technology of building materials. – 2015. – N 2. – P. 13 – 18.
5. Ratner, S. B. Physical plastic mechanics. How to predict the performance? / S. B. Ratner, V. P. Yartsev. – M. : Chemistry, 1992.

УДК 621.311.26 (075.8)  
ББК 31я73

**Муратова Н. С., Климов Д. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КИПАЩЕГО СЛОЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ БИОГЕННЫХ ОТХОДОВ\***

**Muratova N. S., Klimov D. V.**  
Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

### **THE USE OF LOW-TEMPERATURE FLUIDIZED BED THE RECYCLING OF BIOGENIC WASTE\***

*Аннотация.* Исследованы выбросы парниковых газов при сжигании биогенных отходов в котле с низкотемпературным кипящим слоем. Показано соответствие уровня выбросов директивы ЕС2001/80. Отмечена необходимость использования дополнительного пылегазоочистного оборудования при сжигании лузги подсолнечника и ППМ.

*Ключевые слова:* биомасса, кипящий слой.

*Abstract.* Researched the greenhouse gas emissions from burning biogenic waste in the boiler with low-temperature fluidized bed. The compliance of the emissions Directive EC2001/80. The necessity of using additional powder-gas purification equipment from the combustion of sunflower husk and LPW.

*Keywords:* biomass, fluidized bed.

В России ежегодный прирост биогенного сырья составляет более 500 млн. т в пересчете на нефтяной эквивалент [1]. При этом годовой объем добычи нефти в России оценивается в 500 млн. т. Таким образом, в нашей стране биомасса может рассматриваться как потенциальная «вторая нефть». На сегодняшний день фактическая доля биоэнергии в мировом энергообеспечении достигает 10% (не считая торфа). Это в 10 раз больше доли других возобновляемых источников энергии, вместе взятых. Таким образом, биомасса, являясь экологически чистым топливом, может составить реальную конкуренцию ископаемому топливу. Экономически обоснованным для потенциальных потребителей из всех видов биогенных отходов практический интерес представляют вторичные отходы: сельского хозяйства (солома, отходы животноводства), ТБО, иловый остаток очистных сооружений крупных городов. Их утилизация путем прямого сжигания позволяет предприятию получить дополнительную прибыль от реализации тепловой и электрической энергии при наличии когенерации и одновременно избежать штрафов от загрязнения окружающей среды.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержки Министерства образования и науки РФ, уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0116.

## 1. Предельные значения выбросов директива ЕС 2001/80 [2]

| Теплопроизводительность<br>котельной установки, МВт | Норма выброса, мг/м <sup>3</sup> |                         |                                     |                                     |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                     | твердых<br>частиц                | углерода<br>оксида (CO) | азота оксидов<br>(NO <sub>2</sub> ) | серы диоксида<br>(SO <sub>2</sub> ) |
| От 0,1 до 0,3 включ.                                | 600                              | 7500                    | Не устанавли-<br>вается             | Не устанавли-<br>вается             |
| Св. 0,3 " 2 "                                       | 300                              | 1000                    |                                     |                                     |
| " 2 " 25 "                                          | 150                              | 750                     | 500                                 | 800                                 |
| " 25 " 50 "                                         | 100                              | 500                     | 500                                 | 600                                 |
| " 50 " 100 "                                        | 50                               | 500                     | 400                                 | 200                                 |

Технология низкотемпературного (порядка 850 °С) кипящего слоя (КС) [2] при сжигании твердых биогенных отходов позволяет получить тепловую и электрическую энергию с минимальными потерями. При таком уровне температур также отсутствует опасность плавления золы, шлакование топки и снижаются выбросы парниковых газов CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и NO<sub>x</sub>, CO.

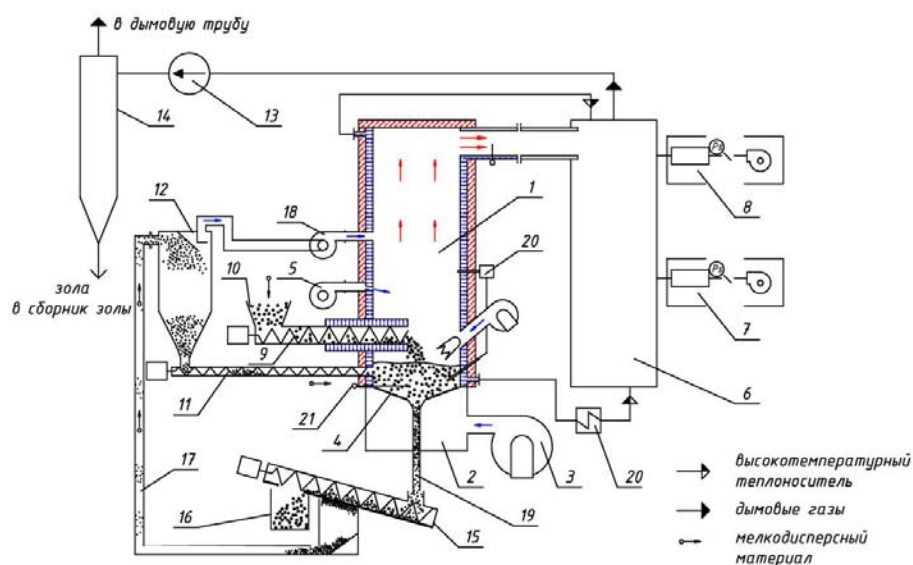
При этом зола, образующаяся при сжигании твердых биогенных отходов, может служить товарным продуктом, а выбросы газообразных продуктов при правильной организации системы очистки удовлетворяют требованиям, установленным директивой ЕС 2001/80 (табл. 1) и отечественными ГОСТами.

Нами проведены исследования сжигания нескольких видов биогенных отходов (солома, ППМ, иловый осадок) в котле с КС мощность 0,5 МВт (рис. 1, 2) с системой



Рис. 1. Внешний вид котла КС-5

мокрой очистки дымовых газов. В установке использовался «мокрый» циклон СИОТ № 2, работающий в режиме «захлебывания». Применение «мокрого» циклона обеспечивает резкое снижение эмиссии вредных выбросов в окружающую среду и повышает КПД котла. Для решения вопросов логистики биогенные отходы предварительно прошли стадию гранулирования, позволяющую легко автоматизировать процесс их доставки и сжигания. В котле сжигались биогенные отходы сельского хозяйства – соломенные гранулы, относящиеся к 5 классу опасности по степени воздействия на окружающую среду и гранулированная подстильно-пометная масса птицефабрик – 4 класс опасности. Характеристики используемого топлива представлены в табл. 2.



**Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной котельной установки:**

1 – топочный узел; 2 – узел подачи первичного (дутьевого) воздуха;  
 3 – вентилятор для подачи первичного (дутьевого) воздуха; 4 – воздухораспределительная решетка; 5 – вентилятор для подачи вторичного воздуха; 6 – утилизатор тепла дымовых газов;  
 7 – узел подачи жидкого топлива; 8 – узел подачи газообразного топлива; 9 – узел подачи твердого топлива со шнеком с расходным бункером (поз. 10); 11 – узел подачи инертного материала или катализатора со шнеком и бункером (поз. 12); узел очистки дымовых газов, включая дымосос (поз. 13) и мокрый» циклон (поз. 14); узел удаления золы из топочного узла, включая шнек (поз. 15); сепаратор для отделения крупных частиц (поз. 16); трубопровод для рециркуляции мелкодисперсного материала (поз. 17); вентилятор (поз. 18) для возврата мелкодисперсного материала в топочный узел и трубу для слива золы (поз. 19); 20 – воздушный теплообменник для охлаждения высокотемпературного теплоносителя

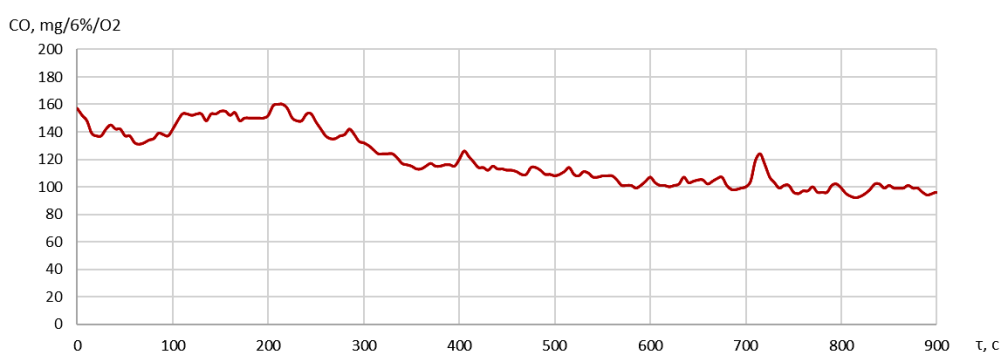
## 2. Характеристики различных видов биомассы [3]

|                                 | Солома | Лузга подсолнечника | ППМ  |
|---------------------------------|--------|---------------------|------|
| Низшая теплота сгорания, МДж/кг | 16,6   | 17,1                | 10,7 |
| Зольность, %                    | 7,48   | 5,1                 | 10,8 |
| Влажность, %                    | 8      | 6...9,85            | 28   |
| Элементный состав               |        |                     |      |
| С, %                            | 41     | 51,5...52           | 32,4 |
| Н, %                            | 5,85   | 5,08                | 3,5  |
| N, %                            | 0,3    | 0,6...1,4           | 0,1  |
| S, %                            | 0,1    | 0,12                | 0,6  |
| Cl, %                           | 0,094  | 0,1                 |      |
| O, %                            | 38,3   | 36...43             | 24,5 |
| T плавления золы, °С            | 1050   | 800                 | 980  |

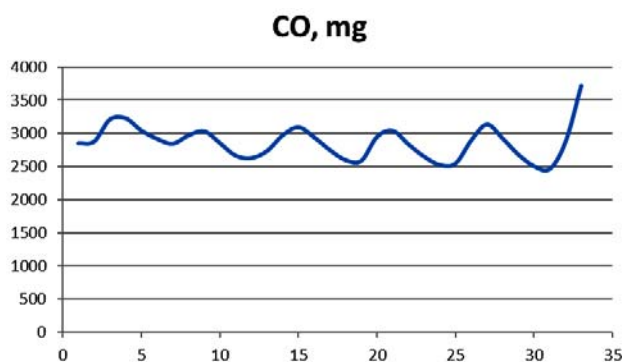
Дымовые газы, образующиеся при сжигании биогенных отходов, обычно содержат в себе следующие вредные вещества: пыль (летучая зола); тяжелые металлы; окислы серы ( $\text{SO}_2$ ); окислы азота ( $\text{NO}_x$ ); окислы углерода ( $\text{CO}$ ); хлористый водород ( $\text{HCl}$ ); фтористый водород ( $\text{HF}$ ); диоксины и фураны. Эффективность работы системы очистки оценивалась по результатам замеров температуры, коэффициента избытка воздуха, содержания окиси углерода, монооксида азота, окислов азота и окислов серы, а также содержание пыли в дымовых газах на выходе из котельной установки до и после «мокрого» циклона с помощью газоанализатора MRU «VarioPlus» и пылемера S 305 7 L1Y7-S-R Sintrol.

Результаты анализа продуктов сгорания показали соответствие в сравнении с предельными значениями, установленными директивой ЕС 2001/80 (в частности концентрация золы в дымовых газах сжигательных установок не должна превышать  $100 \text{ мг/м}^3$  (при  $\text{CO}_2 - 7 \%$ )). Мокрая очистка газов позволяет обеспечить эти значения. Содержание пыли в дымовых газах до «мокрого» циклона составляет  $0,5 \text{ г/м}^3$ , после «мокрого» циклона содержание пыли снизилось до  $0,1 \text{ г/м}^3$ , т.е. уменьшилось в 5 раз.

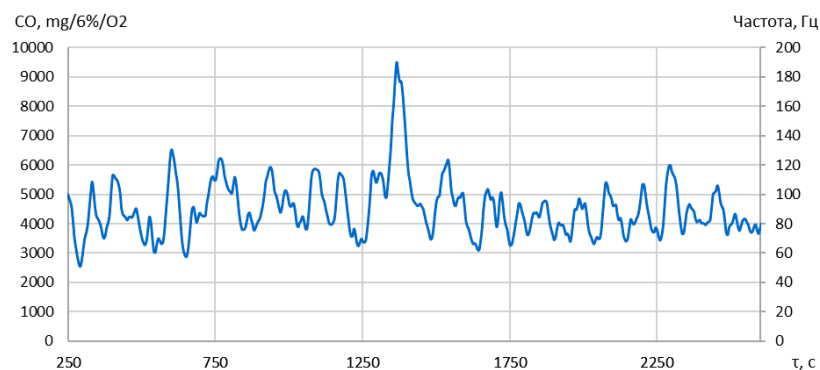
Анализ концентрации монооксида углерода в продуктах сгорания (рис. 3 – 5) показал, что директиве ЕС 2001/80 соответствует только сжигание соломенных гранул. Для подстилично-пометной массы и гранул из лузги подсолнечника требуется дополнительная степень очистки, например, использование в «мокром» циклоне вместо воды известкового раствора.



**Рис. 3. Концентрация окиси углерода в дымовых газах при сжигании в котле с КС соломенных гранул [3]**



**Рис. 4. Концентрация окиси углерода в дымовых газах при сжигании в котле с КС подстилично-пометной массы**



**Рис. 5. Концентрация окиси углерода в дымовых газах при сжигании в котле с КС гранул из лузги подсолнечника**

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. При сжигании биомассы необходимо применять первичные меры по снижению уровня выбросов загрязняющих веществ, главным из которых является уменьшение уровня влажности топлива, такие как гранулирование или сушка.
2. При сжигании биомассы необходимо наладить управление процессом горения с учетом влияния на выбросы таких параметров как температура горения, время пребывания частиц топлива в топке, коэффициент избытка воздуха.
3. При сжигании биомассы в котлах с КС необходимо рассмотреть возможность регулирования подачи вторичного воздуха для дожигания топлива.
4. При сжигании исследуемых видов биомассы необходимо применять эффективное пылегазоочистное оборудование для соответствия нормам ЕС 2001/80.

#### *Список использованных источников*

1. <http://www.nkj.ru/archive/articles/24490/>
2. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants.
3. Гарзанов, А. Л. Производство энергии из отходов птицеводства: экономические и технологические аспекты. – URL : <http://www.agk-eco.ru/news/proizvodstvo-energii-iz-othodov-pticevodstva.html>.

#### *References*

1. <http://www.nkj.ru/archive/articles/24490/>
2. Directive 2001/80/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants.
3. Gasanov, A. L., Energy production from poultry waste: economic and technological aspects. – URL : <http://www.agk-eco.ru/news/proizvodstvo-energii-iz-othodov-pticevodstva.html>.

**Беляев П. С., Макеев П. В., Устьян Е. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ  
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ  
ОТХОДОВ ЦСП И ВТОРИЧНОГО ПОЛИПРОПИЛЕНА**

**Belyaev P. S., Makeev P. V., Ustjan E. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**STUDY PROCESS FOR PRODUCING COMPOSITE MATERIAL BASED  
ON DSP AND WASTE RECYCLED POLYPROPYLENE**

*Аннотация.* В данной статье рассматривается проблема загрязнения окружающей среды отходами цементно-стружечных плит ЦСП и полимерными отходами, а так же приводится способ решения данной проблемы путем использования отходов ЦСП и полимерных отходов для создания композиционного материала на их основе.

*Ключевые слова:* отходы, композиты, полимеры.

*Abstract.* This article deals with the problem of environmental pollution and waste DSP polymer waste, as well as provides a way to solve this problem through the use of DSP waste and plastic waste to create a composite material based on them.

*Keywords:* waste, composites, polymers.

Одним из перспективных направлений в области получения легких и прочных конструкционных материалов является создание наполненных полимерных композитов с заданным комплексом свойств. Причем, конкурентоспособность разрабатываемых материалов может быть обеспечена применением вторичных полимерных материалов в качестве полимерной матрицы и отходов промышленного производства или бытовых отходов – в качестве наполнителей.

В настоящее время существует проблема загрязнения окружающей среды отходами производства цементно-стружечных плит (ЦСП), представляющих собой мелкодисперсную пылевидную смесь цементного камня и древесных волокон, образующуюся в результате распиловки плит ЦСП под заданный размер товарной продукции. Таких отходов даже в условиях одного предприятия образуется свыше 10 кубометров в день. Попытки вернуть эти отходы в технологический цикл получения плит ЦСП не увенчались успехом из-за недопустимого снижения качества готовой продукции.

В связи с этим открывается перспектива возможного использования отходов производства ЦСП для получения легких и прочных конструкционных материалов [1].

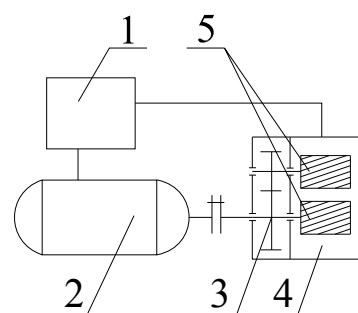
С другой стороны загрязнение окружающей среды отходами полимерных материалов, в последнее время приобретает катастрофические масштабы. По подсчетам специалистов в ближайшие годы в России количество пластиковых отходов составит более 1 млн. т в год, тогда как процент их утилизации является минимальным [2]. Принимая в расчет специфические свойства полимерных материалов, практически не подлежащих разложению в естественной среде, проблема их утилизации является в большей мере экологической и, соответственно, предусматривающей риск для здоровья человека. Однако в настоящее время проблема переработки отходов полимерных материалов становится актуальной не только с позиций охраны окружающей среды. При дефиците органического сырья полимерные отходы становятся богатым материальным и энергетическим ресурсом, то есть важным экономическим фактором. Их повторное использование позволяет сократить использование естественных ресурсов, снизить выбросы в окружающую среду и уменьшить потребление энергии. Таким образом, использование отходов полимерных материалов в качестве полимерной матрицы при производстве композиционного материала позволит уменьшить экологическую нагрузку и снизить себестоимость конечного продукта [3].

В качестве полимерного связующего было решено использовать отходы полипропилена (ПП), так как ПП является весьма распространенным полимером, обладающим следующими полезными свойствами. Во-первых, полипропилен устойчив к высоким температурам ( $t_{пл} = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Во – вторых, для ПП характерна высокая ударная прочность (чем выгодно отличается от ПЭ), высокая стойкость к многократным изгибам, твердость, низкая паро- и газопроницаемость. В – третьих, вследствие своей неполярной структуры, полипропилен устойчив к действию химикатов. Также ПП устойчив к воздействию водных растворов неорганических соединений – солей, кипящей воды и щелочей [4].

Для проведения исследований была использована экспериментальная установка на основе смесителя Брабендера (рис. 1), позволяющая изменять в широком диапазоне режимные и конструктивные параметры [5].

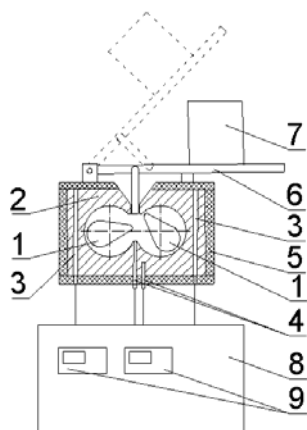
Вращение роторов осуществляет мотор-редуктор 2; второй ротор получает вращение от приводного через зубчатую передачу 3 с передаточным отношением 1,5. Частота вращения рабочих органов регулируется в диапазоне от 30 до 90 об/мин. Камера обогревается шестью трубчатыми электронагревателями. Щит управления 1 предназначен для управления электроприводом смесителя и поддержанием температуры в рабочей зоне.

Смешение происходит следующим образом: ингриденты загружаются в загрузочную воронку камеры при вращающихся роторах и поддавливается загрузочным устройством 6 (рис. 2). Смесительные роторы вращаются в корпусе камеры в противоположных



**Рис. 1. Схема устройства:**

- 1 – шкаф управления;
- 2 – электродвигатель;
- 3 – фрикционные шестерни;
- 4 – смесительная камера;
- 5 – смесительные органы



**Рис. 2. Схема камеры микросмесителя:**

- 1 – роторы; 2 – смесительная камера; 3 – трубчатые электронагреватели; 4 – термопары; 5 – пластины теплоизолятора; 6 – рычаг; 7 – груз; 8 – щит управления; 9 – приборы для измерения и задания температуры

направлениях с различной частотой, при этом ведущий ротор вращается с большей частотой, чем ведомый. В результате этого направление сил, действующих на находящуюся между роторами смесь, постоянно меняется, способствуя интенсивному перемешиванию.

После окончания цикла смешения загрузочное устройство снимается, и полученная смесь выгружается вручную [6].

Были произведены исследования влияния на свойства композиционного материала температуры в камере смешения, частоты вращения рабочих органов в режиме смешения и конфигурации роторов. Получаемый композиционный материал имеет перспективу использования при производстве строительных изделий.

#### *Список использованных источников*

1. Хрущев, С. П. Технология получения полимер-песчаной черепицы из отходов термопластов / С. П. Хрущев, И. В. Шашков, А. С. Клинков, П. С. Беляев // Полимеры в строительстве : тез. докл. – Казань, 2004. – С. 110.
2. Клинков, А. С. Утилизация полимерной тары и упаковки / А. С. Клинков, П. С. Беляев, М. В. Соколов, И. В. Шашков. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 64 с.
3. [http://hromax.ru/pererabotka\\_polimernyih\\_othodov.html](http://hromax.ru/pererabotka_polimernyih_othodov.html). Проверено 30.05.2016.
4. Файзуллин, И. З. Древесно-полимерные композиционные материалы на основе полипропилена и модифицированного древесного наполнителя [текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.17.06) / ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». – Казань, 2016. – 24 с.
5. Клинков, А. С. Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов / А. С. Клинков, М. В. Соколов, В. Г. Однолько, П. С. Беляев. – М. : Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 196.
6. Гуреев, С. С. Получение композита с заданными показателями качества из вторичного полиэтилена в смесителе периодического действия [текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук (05.02.13) / ФГБОУ ВПО Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2011. – 18 с.
7. Беляев, П. С. Решение проблемы утилизации полимерных отходов путем их использования в процессе модификации дорожного вяжущего / П. С. Беляев, О. Г. Маликов, С. А. Меркулов, Д. Л. Полушкин, В. А. Фролов // Строительные материалы. 2013. – № 10. – С. 38 – 41.
8. Kochetov, V. I. Design of the lower gate of a rubber mixer / V. I. Kochetov, D. V. Tulyakov, A. S. Klinkov, P. S. Belyaev, M. V. Sokolov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – V. 46, N. 3. – P. 201 – 211. DOI 10.1007/s10556-010-9318-5.

9. Пат. на изобретение RUS 2247654 18.08.2003. Смеситель непрерывного действия для композиционных строительных материалов на основе нефтяных битумов / Забавников М. В., Беляев П. С., Маликов О. Г., Хабаров С. Н.

### *References*

1. Khrushchev S. P. The technology of polymer-sand tile from waste thermoplastics / S. P. Hrushev, I. V. Shashkoff, A. S. Klinkov, P. S. Belyaev // *Polymers in construction: Tez.dokl.* – Kazan, 2004. – P. 110.

2. Klinkov, A. S. Dispose of plastic containers and packaging / A. S. Klinkov, P. S. Belyaev, M. V. Sokolov, I. V. Shashkov. – Tambov : Publishing House of the Thumb. state. tehn. University Press, 2008. – 64 p.

3. [http://hromax.ru/pererabotka\\_polimernyih\\_othodov.html](http://hromax.ru/pererabotka_polimernyih_othodov.html) Checked 05/30/2016

4. Fayzullin, I. Z. Wood-polymer composite materials based on polypropylene and modified wood filler [text]: Author. Dis. ... cand. tehn. Sciences (05.17.06) / VPO “Kazan State Technological University”. – Kazan, 2016. – 24 p.

5. Klinkov, A. S. Designing a batch mixer in the preparation of a given quality thermoplastics composites from waste / A. S. Klinkov, M. V. Sokolov, V. G. Odnolko, P. S. Belyaev. – M. : “Spectrum” Publishing House, 2012. – P. 196.

6. Gureev, S. S. Preparation of the composite with desired levels of quality recycled polyethylene batch mixer [text] : Author. Dis. ... cand. tehn. Sciences (05.02.13) / VPO Thumb. state. tehn. Univ. – Tambov, 2011. – 18 p.

7. Belyaev P. S. Solution recycling plastic waste problems by using them in the process of modification of the road binder / P. S. Belyaev, O. G. Malikov, S. A. Merkulov, D. L. Polushkin, V. A. Frolov // *Building materials.* – 2013. – N 10. – P. 38 – 41.

8. Kochetov, V. I. Design of the lower gate of a rubber mixer / V. I. Kochetov, D. V. Tulyakov, A. S. Klinkov, P. S. Belyaev, M. V. Sokolov // *Chemical and Petroleum Engineering.* – 2010. – V. 46, N. 3. – P. 201 – 211. DOI 10.1007 / s10556-010-9318-5.

9. Pat. RUS 2,247,654 18.08.2003. Mixer continuous for composite building materials based on bitumen / Zabavnikov M. V., Belyaev P. S., Malikov, O. G., Khabarov S. N.

**Рухов А. В.**

Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК МЕТОДОМ ГАЗОФАЗНОГО ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ**

**Rukhov A. V.**

Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE INDUSTRIAL PRODUCTION OF CARBON NANOTUBES BY CHEMICAL VAPOR DEPOSITION CHEMICAL**

*Аннотация.* На примере промышленного производства многостенных углеродных нанотрубок, организованное на базе ООО «НаноТехЦентр», проведен экологический анализ объекта наноиндустрии. Предложены индексы для оценки экологической безопасности технологических стадий производства. По результатам экологического анализа предложены пути совершенствования производства углеродных нанотрубок.

*Ключевые слова:* промышленная экология, химическая технология, углеродные нанотрубки.

*Abstract.* For example, industrial production of multi-walled carbon nanotubes, organized on the basis of “NanoTechCenter” Ltd. conducted an environmental analysis of the nanotechnology industry object. Proposed indices to assess the ecological safety of technological stages of production. As a result of the environmental analysis suggest ways to improve the production of carbon nanotubes.

*Keywords:* industrial ecology, chemical technology, carbon nanotubes.

В настоящий момент многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ) перешли из состояния лабораторных материалов, к разряду востребованного сырья используемого при получении многих продуктов и изделий. Например, бетонов специального назначения, конструкционных и функциональных полимерных материалов и др. [1]. Соответственно разработка и создание промышленных технологий получения МУНТ является актуальной задачей для научных и инженерных коллективов.

Мировой опыт продемонстрировал, что наиболее приемлемой технологией получения МУНТ в промышленных объемах является газофазное химическое осаждение при термическом пиролизе углеводородов, в частности, реализованной в ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов. В тоже время ни одно промышленное производство, реализующее химические технологии, в том числе в сфере наноиндустрии, не может быть реализовано без учета его экологических аспектов.

При проведении экологического анализа промышленного производства МУНТ были рассмотрены следующие негативные факторы:

- 1) загрязнение атмосферы опасными газообразными веществами;
- 2) загрязнение атмосферы опасными жидкими веществами;
- 3) загрязнение атмосферы опасными твердыми веществами, в том числе наночастицами;
- 4) загрязнение закрытых и открытых источников воды опасными жидкими веществами;
- 5) загрязнение закрытых и открытых водных источников опасными твердыми веществами, в том числе наночастицами;
- 6) загрязнение почвы опасными жидкими веществами;
- 7) загрязнение почвы опасными твердыми веществами, в том числе наночастицами.

Введены два вида технологических стадий промышленного производства МУНТ по негативному воздействию:

1. не оказывающие воздействие;
2. оказывающие воздействие.

При проведении экологического анализа для каждой единицы аппаратного оформления технологических стадий выставлялись индексы  $X:Y_1/Y_2/ \dots$ , где  $X$  – вид воздействия;  $Y_i$  – факторы воздействия. Например, 1:0 – технологическое оборудование не представляет экологической опасности или 2:1/3 – оказывает отрицательное воздействие в виде загрязнения воздушного бассейна опасными газообразными и твердыми веществами. Экологический анализ промышленного производства проводится для двух режимов работы: штатного и аварийного.

Рассмотрены следующие технологические стадии:

1. Получение катализатора для синтеза МУНТ.
2. Подготовка газообразного углеводородного сырья.
3. Подготовка жидкого углеводородного сырья.
4. Получение МУНТ.
5. Очистка, сушка, измельчение, классификация и фасовка МУНТ.

Определены три технологические стадии, по предложенной классификации, в штатном режиме работы, характеризующиеся негативным воздействием на окружающую среду: стадии получения катализатора и МУНТ, стадия очистки, сушки, измельчения, классификации и фасовки МУНТ.

Стадия получения катализатора по экологической безопасности характеризуется побочными продуктами в виде оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), выбрасываемых в атмосферу. Проведенный анализ источников [2 – 6] показал, что сорбционные методы извлечения оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) малоэффективны по причине малой активности  $\text{NO}$ , относящегося к несолеобразующему соединению. Наиболее целесообразным представляется каталитическое восстановление оксидов азота в газообразных выбросах технологической стадии производства катализатора [7 – 9]. Соответственно предлагается ввести на технологической стадии производства катализатора аппарат для каталитического обезвреживания газовых выбросов образующихся при термическом разложении исходных компонентов катализатора.

## 1. Компоненты смеси газообразных продуктов пиролиза

| Компонент           | Водород | Метан | Этилен | Этан | И-Бутан |
|---------------------|---------|-------|--------|------|---------|
| Концентрация, % об. | 60,5    | 31,4  | 6,6    | 1,4  | 0,1     |

В качестве альтернативы получения катализаторов методами, подразумевающих термическое разложение нитратов, можно рассмотреть вопросы их получения электрохимическим способом [10].

Технологическая стадия получения МУНТ характеризуется образованием газообразных продуктов пиролиза. С использованием методов газовой хроматографии, для режимов синтеза, обеспечивающих высокую конверсию углеводородов, было показано большое содержание метана в газообразных продуктах пиролиза. Состав отходящих газов представлен в табл. 1.

В результате тестовой эксплуатации на стенках отводных коллекторов реакционного аппарата обнаружены смолистые образования. Методами высокоэффективной газовой хроматографии было показано, что обозначенные смолы являются представителями класса полиядерных ароматических соединений (смесь антрацена и нафталина) и бензола.

Таким образом, содержание в побочных продуктах пиролиза значительного количества метана, при промышленных объемах выпуска МУНТ, потребует их обработку для снижения нагрузки на атмосферу. С другой стороны содержание полиядерных ароматических соединений не позволяет выброс побочных газов без обезвреживания при любых объемах производства.

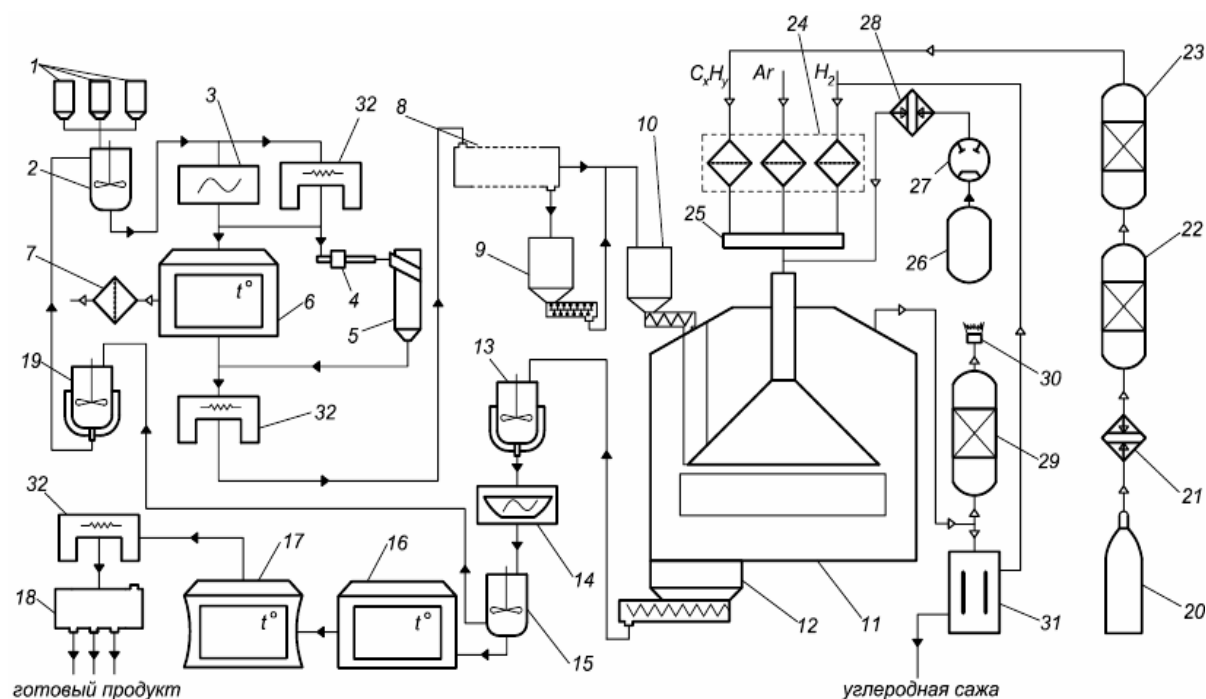
Соответственно предлагается введение в технологическую схему дополнительной стадии обезвреживания газообразных продуктов пиролиза. В результате большого содержания в побочных газах водорода, являющего восстановителем катализатора и выполняющего регулируемую функцию в процессах получения МУНТ, представляется рациональным после отделения полиядерных ароматических соединений методами конденсации или абсорбции, частичный его рецикл. Отходящие газы предлагается сжигать при избытке воздуха для получения тепла, используемого для других технологических и бытовых нужд производства, например, получения дистиллированной воды, используемой на стадии получения катализатора.

Очистка побочных газообразных веществ от нафталина и антрацена рекомендуем реализовывать методом поглощения паров маслами с последующей их регенерацией отгонкой водяным паром [11]. В качестве жидких поглотителей применяют каменноугольное или соляровое масло.

В соответствии с применяемой в настоящее время технологией, побочными веществами технологической стадии очистки, сушки, измельчения, классификации и фасовки МУНТ, являются водные растворы азотной кислоты, нитратов никеля и магния. Сброс данной смеси в коллекторы городской или промышленной канализации недопустим, а утилизация в условиях специализированных предприятий является дорого-

стоящим. Предлагается введение технологическую схему стадии переработки побочных продуктов кислотной очистки МУНТ в исходные вещества для получения катализатора. Технология заключается в нейтрализации азотной кислоты гидроксидами магния и никеля (II) с последующим концентрированием до состояния, определяемого технологией получения катализатора.

В результате проведенной экологического анализа промышленного производства МУНТ и с учетом технологических рекомендаций была проведена модернизация технологической схемы в ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов. Модернизированная технологическая схема была принята в качестве базовой при проектировании. Базовая технологическая схема представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Базовая технологическая схема производства МУНТ:**

- 1 – исходные компоненты катализатора; 2 – смеситель;  
 3 – ультразвуковой механоактиватор; 4 – аппарат пульсирующего горения (АПГ);  
 5 – циклон; 6 – печь; 7 – аппарат каталитической очистки газообразных продуктов  
 получения катализатора; 8 – классификатор; 9 – гранулятор; 10 – дозатор катализатора;  
 11 – реактор для получения МУНТ; 12 – устройство выгрузки МУНТ;  
 13 – аппарат кислотной очистки МУНТ; 14 – аппарат ультразвуковой очистки МУНТ;  
 15 – нейтрализатор очищающих агентов; 16 – сушилка; 17 – вакуумная печь;  
 18 – классификатор готового продукта; 19 – выпарной аппарата с рубашкой и мешалкой;  
 20 – газгольдер; 21 – испаритель сжиженных углеводородов; 22 – скруббер  
 для извлечения тиолов; 23 – адсорбционный демпфер; 24 – блок фильтров;  
 25 – смеситель газов; 26 – емкость с жидкими углеводородами; 27 – нанос-дозатор  
 жидких углеводородов; 28 – испаритель жидких углеводородов; 29 – скруббер  
 для извлечения полиароматических углеводородов; 30 – газовая горелка;  
 31 – аппарат утилизатор газообразных продуктов пиролиза;  
 32 – измельчитель (аппарат вихревого слоя ферромагнитных частиц – АВС)

#### *Список использованных источников*

1. Ткачев, А. Г. Углеродные наноматериалы серии «Таунит»: производство функционализация, применение / А. Г. Ткачев, В. Н. Артемов, А. В. Мележик, А. В. Рухов, А. А. Аладинский и др. // Нанотехника. – 2014. – № 1(37). – С. 32 – 44.
2. Носков, А. С. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба / А. С. Носков, М. А. Савинкина, Л. Я. Анищенко. – Новосибирск, 1990. – 184 с.
3. McGlamery, G. G. Cost Companions of Flue Gas Desulfurization Systems / G. G. McGlamery, R. L. Torstrick // presented at the EPA Flue Gas Desulfurization Symposium. – Atlanta, 1974.
4. Maxwell, G. D. Technical and Economic Evaluations for NO<sub>x</sub> Control Technology / G. D. Maxwell, T. A. Burnett // Presented at the 73-rd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. June 22 – 27, 2006. Montreal, Canada. – Canada, 2006. – P. 80 – 91.
5. Wong, W. C. Reduction of NO with NH<sub>3</sub> on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – and TiO<sub>2</sub> – ported Metal Oxide Catalysts / W. C. Wong, K. Nobe // Ing. Eng. Chem. Prod. Res. Dev. – 2009. – N 25. – P. 179 – 186.
6. Herrlander, B. The Flakt de NO<sub>x</sub> concept // Catal. Today. – 2011. – V. 4, N 2. – P. 219 – 234.
7. Носков, А. С. Технологические методы защиты атмосферы от вредных выбросов на предприятиях энергетики / А. С. Носков, З. П. Пай. – Новосибирск : СО РАН, ГПНТБ, 1996. – С. 156.
8. Фролов, Ю. Н. Организация защиты окружающей природной среды в автотранспортном комплексе // Автоматиз. и соврем. технол. 1997. – № 7. – С. 37 – 44.
9. Попова, Н. М. Катализаторы очистки выхлопных газов автотранспорта. – Алма-Ата : Наука Каз. ССР, 1987. – 224 с.
10. Никифорова, Е. Ю. Электрохимический синтез ультрамикродисперсного катализатора для получения углеродных наноструктурированных материалов / Е. Ю. Никифорова, А. В. Рухов, А. Б. Килимник, Е. Ю. Филатова, А. Г. Ткачев // Катализ в промышленности. – М., 2011. – № 6. – С. 5 – 12.
11. Зуев, В. П. Производство сажи / В. П. Зуев, В. В. Михайлов. □ М. : Химия, 1965 – 328 с.

#### *References*

1. Tkachev, A. G. Carbon nanomaterials “Taunit” series: the production of functionalization, use / A. G. Tkachev, V. N. Artemov, A. V. Melezhik, A. V. Rukhov, A. A. Aladinsky et al. // Nanotechnics. – 2014. – N 1(37). – P. 32 – 44.
2. Noskov, A. S. The impact of thermal power plants on the environment and ways to reduce the damage done / A. S. Noskov, M. A. Savinkina, L. Ya. Anischenko. – Novosibirsk, 1990. – 184 p.
3. McGlamery, G. G. Cost Companions of Flue Gas Desulfurization Systems / G. G. McGlamery, R. L. Torstrick // presented at the EPA Flue Gas Desulfurization Symposium. – Atlanta, 1974.

4. Maxwell, G. D. Technical and Economic Evaluations for NO<sub>x</sub> Control Technology / G. D. Maxwell, T. A. Burnett // Presented at the 73-rd Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. June 22 – 27, 2006. Montreal, Canada. – Canada, 2006. – P. 80 – 91.
5. Wong, W. C. Reduction of NO with NH<sub>3</sub> on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – and TiO<sub>2</sub> – ported Metal Oxide Catalysts / W. C. Wong, K. Nobe // *Ing. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.* – 2009. – N 25. – P. 179 – 186.
6. Herrlander, V. The Flakt de NO<sub>x</sub> concept // *Catal. Today.* – 2011. – V. 4, N 2. – P. 219 – 234.
7. Noskov, A. S. Technological methods of protecting the atmosphere from harmful emissions by power plants / A. S. Noskov, Z. P. Pai. – Novosibirsk : SB RAS, SPSTL, 1996. – P. 156.
8. Frolov, Yu. N. Organization of environment protection in the motor complex // *Automate and tell lies, primary process.* – 1997. – N 7. – P. 37 – 44.
9. Popova, N. M. Catalysts vehicle exhaust gas cleaning. – Alma-Ata : Kaz Science. SSR, 1987. – 224 p.
10. Nikiforova, E. Yu. Electrochemical synthesis ultramikrodisperse catalyst for the production of carbon nanostructured materials / E. Yu. Nikiforova, A. V. Rukhov, A. B. Kilimnik, E. Yu. Filatova, A. G. Tkachev // *Catalysis in industry.* – M., 2011. – N 6. – P. 5 – 12.
11. Zuev, V. P. Production of carbon black / V. P. Zuev, V. V. Mikhailov. – M. : Chemistry, 1965. – 328 p.

УДК 620.2-022.532  
ББК 35.710

Полуэкттов В. Л.<sup>1</sup>, Полуэктова С. Л.<sup>1</sup>, Баронин Г. С.<sup>1</sup>, Бузник В. М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов),

<sup>2</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов  
(Россия, г. Москва)

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ НАНОКОМПОЗИТОВ\*

Poluektov V. L.<sup>1</sup>, Poluektova S. L.<sup>1</sup>, Baronin G. S.<sup>1</sup>, Buznik V. M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov),

<sup>2</sup>All-Russian scientific-research institute of aviation materials  
(Russia, Moscow)

## ECOLOGICAL ASPECTS OF NEW NANOCOMPOSITE PROCESSING TECHNOLOGY APPLICATION

*Аннотация.* В работе рассматриваются особенности и экологические аспекты результатов научно-исследовательской работы по использованию новой энергоресурсосберегающей технологии переработки в твердой фазе (температура обработки материала от комнатной до предплавления) и получения нанокomпозитов на основе полимеров, в том числе на основе фторполимеров перспективным методом из газовой фазы.

*Ключевые слова:* нанокomпозиты, энергоэффективные технологии, физико-механические, теплофизические, твердофазная экструзия, политетрафторэтилен (ПТФЭ), пластическая деформация.

*Abstract.* This work represents characteristics and ecological aspects of new energy saving technology for nanocomposites solid-phase processing (from indoor to premelting temperature). Also the article considers the production of polymer-based nanocomposites, including fluoropolymers with the perspective method from the gas phase.

*Keywords:* nanocomposites, energy efficient technologies, physico-mechanical, thermo-physical properties, solid-phase extrusion, polytetrafluoroethylene (PTFE), plastic deformation.

Природа на протяжении столетий использовала при создании органических веществ из всего многообразия доступных химических элементов лишь несколько основных и это: углерод, кислород, водород, серу, фосфор и азот. И первый элемент – углерод, в нашем перечне не случаен, так как абсолютная часть природных соединений имеют в своем составе его атомы. Но и технический прогресс не стоит на месте, и современная химия научилась создавать органические соединения с применением других

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки РФ в рамках базовой части Госзадания № 2014/219, код проекта 2079 и гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, код проекта НШ – 2411.2014.3.

элементов, из которых мы рассмотрим фтор. Соединения в различных комбинациях углерода и фтора привело к созданию большого числа важных материалов. Остановимся на наиболее распространенном классе фторуглеродных материалов, образующих фторполимеры. И одним из основных фторсодержащих полимеров является политетрафторэтилен, открытый лишь в XX в. сотрудником американской фирмы «Дюпон» [1].

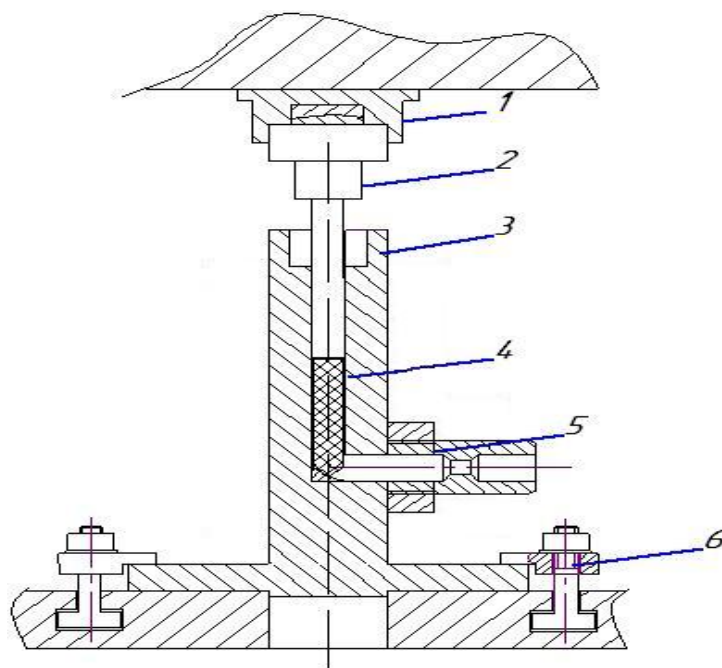
Данный полимер сам по себе обладает уникальным набором физических, химических, электроизоляционных, антифрикционных свойств, многие из которых являются исключительными в своем роде. Однако потребности и тенденции стремительного развития современной техники и технологий ставят жесткие критерии к применению материалов функционального и конструкционного назначения для экстремальных условий эксплуатации. Традиционные технологии переработки и промышленные методы производства связанных с ними изделий, несут за собой не только позитивные последствия в виде прогресса техники и технологий, но и отрицательные в качестве масштабных загрязнений окружающей среды, несущие за собой необратимые процессы нарушения глобальной экологии. Поэтому важной прикладной задачей современного материаловедения является получение нового класса композиционных материалов, при помощи применения прогрессивных технологий переработки, в соответствии международным стандартам.

Твердофазная экструзия является энерго- и ресурсосберегающим технологическим способом структурной модификации в области переработки пластических масс под действием высокого гидростатического давления в твердом агрегатном состоянии, сопровождаемым не только повышением эффективности используемой оснастки за счет сокращения числа и времени технологических операций производства, а также улучшением эксплуатационных характеристик и качества получаемых изделий. [2].

Целью настоящей работы является развитие процессов структурной модификации композиционных полимерных систем благодаря направленной пластической деформации материала. Процесс твердофазной обработки полимерных композитов осуществлялся на экспериментальной ячейке (рис. 1). В качестве объекта исследования использовали политетрафторэтилен (ПТФЭ, ГОСТ 10007–08) в виде порошка. Модифицирующими добавками служили следующие материалы:

- продукт полученный перегонкой шихты ПТФЭ 97% масс и  $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$  3% масс. ч. при температуре 575 °С с последующей десублимацией раствором аммиака – композит ПТФЭ с  $\text{TiO}_2$  (ТФП);
- продукт, полученный путем посадки на микрочастицы фторполимерных порошков наноразмерных кобальтсодержащих кластеров (КоФП) [3].

Результат достигается комбинацией двух методов твердофазного формования полимерных композитов в один технологический цикл. Разработанная технология позволяет получать не только упрочненные заготовки различной формы и размеров под последующую механическую обработку, но и профилированные изделия с регламентированным набором характеристик. Отработаны следующие методы исследования эксплуатационных свойств полимерных композитов: определение удельной скорости поглощения энергии в зависимости от температуры образцов в режиме дифференциально сканирующей калориметрии, измерения величины разрушающего напряжения



**Рис. 1. Схема экспериментальной ячейки для комбинированной  
экструзии полимерных материалов:**

1 – фиксатор пуансона; 2 – пуансон; 3 – матрица; 4 – заготовка полимера;  
5 – фильера; 6 – фиксатор экспериментальной ячейки [5]

в условиях поперечного среза исходных и модифицированных образцов, определение теплостойкости и внутренних ориентационных напряжений методом построения диаграмм изометрического нагрева (ДИН), определение тепло- и температуропроводности, оценка износостойкости в режиме абразивного износа [4].

По итогам проведенных исследований по оценке технологических и эксплуатационных характеристик полученных образцов дана сравнительная оценка предлагаемого метода с традиционными методами по переработке полимерных композиций. Преимущества применения твердофазной технологии по сравнению с другими технологическими процессами очевидны: это не только улучшение эксплуатационных характеристик (разрушающее напряжение в условиях поперечного среза, твердость по Шору Д, величина остаточного напряжения и теплостойкости, коэффициентов теплопроводности, температуропроводности), но и экологических и технико-экономических показателей (производительность, себестоимость, увеличенный срок эксплуатации, отказ от вредных энергозатратных стадий получения расплава, возможность рециклинга материала, безотходность производства) (табл. 1).

Результатом практической реализации предлагаемого способа переработки полимеров планируется разработка комплекса рецептов композиционных материалов, которые будут обладать свойствами, удовлетворяющими области применения изделий. Полученные данные проведенных исследований показывают, что реализация предлагаемого технологического подхода и устройства является перспективной для модернизации существующих и создания новых производств переработки полимеров за счет внедрения энергоэффективных твердофазных технологий [5].

**1. Величины разрушающего напряжения в условиях среза и твердости по Шору Д полимерных композитов ПТФЭ +ТФП и ПТФЭ +КоФП в зависимости от содержания наполнителя и технологии переработки, комбинированная твердофазная экструзия или жидкофазная технология**

| Содержание масс части ТФП и КоФП ( $C_{\text{ТФП}}$ и $C_{\text{КоФП}}$ ) | Жидкофазная технология                       |             |                                     |             | Комбинированная твердофазная экструзия       |             |                                     |             |
|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|----------------------------------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
|                                                                           | Прочность на срез $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа |             | Твердость по Шору Д, Н <sub>D</sub> |             | Прочность на срез $\sigma_{\text{ср}}$ , МПа |             | Твердость по Шору Д, Н <sub>D</sub> |             |
|                                                                           | ПТФЭ + ТФП                                   | ПТФЭ + КоФП | ПТФЭ + ТФП                          | ПТФЭ + КоФП | ПТФЭ + ТФП                                   | ПТФЭ + КоФП | ПТФЭ + ТФП                          | ПТФЭ + КоФП |
| 0                                                                         | 16,4                                         | 16,4        | 55                                  | 55          | 21,1                                         | 21,1        | 55,36                               | 55,36       |
| 0,05                                                                      | 12,7                                         | 14,1        | 53                                  | 54          | 22,8                                         | 46          | 54,46                               | 54,46       |
| 0,1                                                                       | 10,8                                         | 14,5        | 53                                  | 55          | 24,9                                         | 40          | 55,4                                | 55,8        |
| 0,5                                                                       | 11,3                                         | 14,6        | 53                                  | 54          | 20,3                                         | 46          | 53,7                                | 54,9        |
| 1                                                                         | 12,5                                         | 14,9        | 53                                  | 54          | 20,1                                         | 39          | 53,5                                | 54,2        |
| 5                                                                         | 11,6                                         | 14,5        | 54                                  | 53          | 19,5                                         | 35          | 53,4                                | 53,3        |

*Список использованных источников*

1. Логинов, Б. А. Российские фторполимеры: история, технологии, перспективы / Б. А. Логинов, В. М. Бузник, А. Л. Виллемсон. – М. : Изд-во Дом печати-Вятка, 2013. – С. 320.
2. Полуэктов, В. Л. Твердофазная экструзия фторполимерных материалов с использованием деформации простого сдвига // 13 Всерос. с междунар. участием Школа-семинар по структурной макрокинетике им. академика А. Г. Мержанова : тез. докл. – Черноголовка, 2015. – С. 107 – 109.
3. Баронин, Г. С. Исследование строения и свойств полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и наночастиц кобальта / Г. С. Баронин, В. М. Бузник, Г. Ю. Юрков и др. // Перспективные материалы. – 2014. – № 7. – С. 50 – 62.
4. Poluektov, V. L. Features of Combined Solid-Phase Extrusion Technology, Structure and Property Formation of Fluoropolymer-Based Nanocomposites / V. L. Poluektov, V. V. Khudyakov, G. S. Baronin, V. M. Buznik // Advanced materials and technologies. TSTU (Tambov, Russia). – 2016. – N 1. – P. 56 – 60.
5. Полуэктов, В. Л. Особенности технологии комбинированной твердофазной экструзии, формирования структуры и свойств нанокомпозитов на основе фторполимеров / В. Л. Полуэктов, В. М. Бузник, Г. С. Баронин, В. В. Худяков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 20, № 3. – С. 564 – 572.

### *References*

1. Loginov, B. A. Russian fluoropolymers: history, technologies, prospects / B. A. Loginov, V. M. Buznik, A. L. Villemson. – M. : Publishing house Dom pechati-Vyatka, 2013. – P. 320.
2. Poluektov, V. L. Solid-phase extrusion of fluoropolymer materials using deformation of simple shift // 13 Russian with international participation School-seminar on structural Macrokinecs academician A. G. Merzhanov. Abstracts. – Chernogolovka, 2015. – P. 107 – 109.
3. Baronin, G. S. Research of structure and properties of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and nanoparticles of cobalt / G. S. Baronin, V. M. Buznik, G. Yu. Yurkov et al. // Advanced materials. – 2014. – N 7. – P. 50 – 62.
4. Poluektov, V. L. Features of Combined Solid-Phase Extrusion Technology, Structure and Property Formation of Fluoropolymer-Based Nanocomposites / V. L. Poluektov, V. V. Khudyakov, G. S. Baronin, V. M. Buznik // Advanced materials and technologies. TSTU (Tambov, Russia). – 2016. – N 1. – P. 56 – 60.
5. Poluektov, V. L. Technology Features a combination of solid-phase extrusion, the formation of structure and properties of nanocomposites based on fluoropolymers / V. L. Poluektov, V. M. Buznik, G. S. Baronin, V. V. Khudyakov // Bulletin of Tambov State Technical University. – 2014. – V. 20, N 3. – P. 564 – 572.

УДК 672.86.02  
ББК Г 522

**Кольцов М. А.**  
Тамбовский Государственный Технический Университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СИНТЕЗА МАЛОСЛОЙНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**Koltsov M. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **EQUIPMENT FOR SYNTHESIS OF LOW-LAYER CARBON NANOTUBES. IMPACT ON ENVIRONMENT**

*Аннотация.* Целью данного доклада является определение влияния технологии и оборудования для производства малослойных углеродных нанотрубок на окружающую среду.

*Ключевые слова:* синтез углеродных нанотрубок, окружающая среда.

*Abstract.* The purpose of this report is definition of influence of technology and the equipment for production of low-layer carbon nanotubes on environment.

*Keywords:* synthesis of carbon nanotubes, environment.

В настоящее время наука не стоит на месте. Создается много нового. Так и в сфере нано – инженерии ведется активное изучение углеродных нанотрубок. Углеродные нанотрубки обладают уникальными свойствами и имеют широкое распространение во многих направлениях человеческой деятельности.

Среди достоинств можно выделить особые свойства углеродных нанотрубок. Они являются прочным материалом, который под действием механических воздействий не разрушается. Кроме того, они хорошо работают на изгиб и растяжения. Это стало возможным благодаря замкнутой каркасной структуре. Углеродные нанотрубки могут использоваться для упрочнения металлов и сплавов и усиления жаропрочности мягких металлов (например, медь), имеющих хорошую теплопроводность, но низкую прочность. Их применение не ограничивается одной отраслью. Трубки нашли применение в автомобилестроении, электронике, медицине и энергетике.

В результате множественных исследований было выяснено, что углеродные нанотрубки могут вызывать такие же проблемы, как и асбестовые волокна, то есть возникают различные злокачественные опухоли, а также рак легких. Так как углеродные нанотрубки имеют маленький вес и размеры, они легко попадают в организм человека вместе с воздухом. Далее, они попадают в плевру и входят в грудную клетку, и со временем вызывают различные осложнения. Ученые провели эксперимент, и добавили в пищу

мышей частички нанотрубок. Изделия малого диаметра практически не задерживались в организме, а вот более крупные – впивались в стенки желудка и вызывали различные заболевания.

На сегодняшний день разработками в данной отрасли занимаются на химических факультетах различных университетов Москвы, Тамбова, Санкт-Петербурга, Новосибирска и Казани. Ведущими производителями углеродных нанотрубок являются фирма «Гранат» и тамбовский завод «Комсомолец». Для производства малослойных углеродных нанотрубок в городе Тамбов на заводе «Комсомолец» имеется реактор компактного слоя (рис. 1).

В основу реактора поставлена задача обеспечить высокую производительность, максимальную однородность и высокое качество получаемого продукта при работе в непрерывном режиме.

Принцип работы заключается в том, что гранулированный твердый катализатор подается в реактор через загрузочное устройство. Далее катализатор попадает на компактный слой, который расположен в нижней части реактора, на нем происходит рост нанотрубок. Затем нанотрубки попадают в бункер устройства выгрузки и далее шнеком транспортируются к выгрузному отверстию [1].

Согласно требованиям [2] работа технологического оборудования и технологической линии производства не должна наносить вред окружающей среде (в определенных пределах) и рабочему персоналу.

В производстве малослойных углеродных нанотрубок применяются следующие компоненты и продукты для активации:

- катализатор;
- пропан-бутановая смесь;
- аргон.

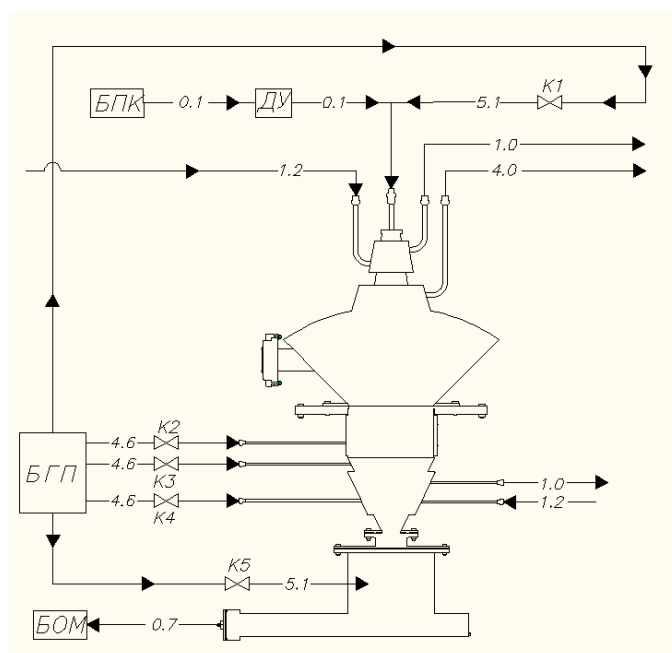


Рис. 1. Реактор компактного слоя

В аппарате – реакторе компактного слоя для получения МСУНТ – рабочей средой является пропан + катализатор. Рабочая среда в аппарате относится к взрывоопасной, так как пропан с воздухом образует взрывоопасную смесь. Класс опасности 4 (малоопасные вещества). При непосредственном контакте местное раздражающее действие на кожу и слизистые оболочки глаз отсутствует.

К противопожарным средствам защиты, используемым на предприятии, относятся огнетушители, песок, лопаты, ведра.

При работе с компонентами рабочей среды необходимо соблюдать санитарно-гигиенические нормы – обязательно надевать резиновые печатки, рабочие комбинезоны из плотной или полипропиленовой ткани, защитные очки и респираторы.

По завершению процесса активации отходные материалы производства необходимо утилизировать.

Углеродные нанотрубки играют важную роль в инновационных технологиях, поэтому изучение и производство углеродных нанотрубок на сегодня актуально. Для того чтобы минимизировать негативное воздействие на здоровье человека, необходимо соблюдать санитарно-гигиенические нормы. Согласно требованиям [2] работа реактора компактного слоя не наносит вред окружающей среде (в определенных пределах) и рабочему персоналу.

#### *Список использованных источников*

1. Ткачев, А. Г. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур / А. Г. Ткачев, И. В. Золотухин. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 316 с.
2. Ткачев, А. Г. Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование защиты окружающей среды : учеб. пособие / А. Г. Ткачев, З. А. Михалева, А. И. Попов, Е. А. Сергеева, А. В. Козачек. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – 60 с.

#### *References*

1. Tkachev, A. G. Equipment and methods of synthesis solid-state nanostructures / A. G. Tkachev, I. V. Zolotukhin. – M. : Mechanical engineering-1, 2007. – 316 p.
2. Tkachev, A. G. Energo – and resource-saving technologies and the equipment of environment protection : manual / A. G. Tkachev, Z. A. Mikhaleva, A. I. Popov, E. A. Sergeyev, A. V. Kozachek. – Tambov : Publishing house of Tamb. state. tehn. un-ty, 2004. – 60 p.

**Образцова Е. Ю.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **СНИЖЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРОИЗВОДСТВА КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**Obraztsova E. Yu.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **REDUCING ENVIRONMENTAL LOADS OF CATALYSTS FOR SYNTHESIS OF CARBON NANOMATERIALS**

*Аннотация.* Показана возможность значительного снижения количества поллютантов за счёт применения электрохимического метода синтеза катализатора, используемого в пиролитическом синтезе углеродных наноматериалов.

*Ключевые слова:* гидроксид натрия, оксид никеля, переменный синусоидальный ток, углеродное нановолокно.

*Abstract.* The possibility of a significant reduction in the number of pollutants through the use of electrochemical method of synthesis of the catalyst used in the synthesis of pyrolytic carbon nanomaterials.

*Keywords:* sodium hydroxide, nickel oxide, alternating sinusoidal current, carbon nanofibers.

Стремление к снижению экологической нагрузки химических производств привело к быстрому росту научного, промышленного, а также коммерческого интереса к применению электрохимических технологий синтеза различных органических и неорганических соединений. В настоящее время большой интерес представляет производство ультрамикродисперсных порошков оксида никеля, которые, используются в каталитическом синтезе углеродных наноматериалов в качестве предкурсора никелевого катализатора [1 – 4].

Существующие распространенные способы получения ультрамикродисперсного порошка оксида никеля – золь-гель метод, метод «мокрого» сжигания отличаются применением различных токсичных химических реагентов, а также большим количеством выбросов в атмосферу поллютантов, создающих экологические проблемы при промышленной реализации [5, 6]. Так, при производстве одного килограмма ультрамикродисперсного порошка оксида никеля методом «мокрого» сжигания в атмосферу выбрасывается около 336 дм<sup>3</sup> диоксида азота. При получении одного килограмма оксида никеля гомогенным золь-гель методом образуется 0,64 дм<sup>3</sup> азотной кислоты и 2,18 дм<sup>3</sup> этанола,

термическое разложение которых приводит к образованию диоксида азота объемом 360 дм<sup>3</sup> и 1672 дм<sup>3</sup> диоксида углерода. Одной из стадий получения катализатора гетерогенным золь-гель методом является синтез прекурсора никеля методом соосаждения. Во время химической реакции происходит гидролиз комплекса аммиака, полученного растворением нитрата никеля в водном растворе нашатырного спирта. Побочным продуктом реакции является нитрат аммония, который удаляют промыванием водой. При получении одного килограмма катализатора необходимо 10 дм<sup>3</sup> воды для удаления 1,714 кг образовавшегося нитрата аммония. При сгорании 1,07 дм<sup>3</sup> этанола образуется 821,3 дм<sup>3</sup> диоксида углерода. Синтез катализатора с использованием лимонной кислоты (цитратный метод), сопровождается выделением значительного количества оксидов азота и углерода: 804,545 дм<sup>3</sup> диоксида азота и 4827,433 дм<sup>3</sup> диоксида углерода на один килограмм катализатора. Метод взрыва металлической проволоки, описанный в работах [7, 8], характеризуется низкой производительностью, сложностью технологического оборудования и большими затратами электроэнергии на единицу продукции.

Недостатки рассмотренных методов требуют разработки способа синтеза ультрамикродисперсных порошков оксидов металлов с целью организации производства углеродных наноматериалов пиролизом углеводородов с меньшей экологической нагрузкой. Этим требованиям отвечает электрохимический синтез на переменном синусоидальном токе, который осуществляется без применения дорогостоящего оборудования и реактивов [9, 10].

Для электрохимического получения ультрамикродисперсного порошка оксида никеля нами была использована установка [10].

Качественный фазовый анализ никельсодержащих порошков определяли методом рентгенофазового анализа. Рентгенофазовый анализ образцов проводили на дифрактометре ARL X'tra при использовании монокроматического рентгеновского излучения, источником которого являлась рентгеновская трубка с медным анодом ( $\lambda = 1,50452 \text{ \AA}$ ).

Пропускание симметричного переменного синусоидального тока через никелевые электроды в щелочном растворе, приводит к их интенсивному разрушению и образованию ультрамикродисперсного порошка оксида никеля. Экспериментально установлено что ростом концентрации и плотности тока скорость разрушения никеля (образования порошка оксида никеля) увеличивается. Максимальная скорость образования порошка наблюдается в 17 М растворе NaOH при плотности тока 2,5 А/см<sup>2</sup>, температуре 343 К и частоте тока 20 Гц.

Рентгенофазовый анализ, порошков оксида никеля, высушенных при температуре 373 К показал, что порошок оксида никеля рентгеноаморфный. Результаты РФА анализа позволяют констатировать, что при 573 К наблюдается начало кристаллизации рентгеноаморфных образцов. На рентгенограммах обнаружены рефлексы соответствующие межплоскостным расстояниям 0,242; 0,207; 0,1474; 0,1259 нм, по совокупности которых прокаленные образцы можно идентифицировать как оксид никеля (II). Рассчитанный по формуле Селякова–Шеррера средний размер частиц для порошков оксида никеля, прокаленных при температуре 573 составляет 6 нм.

Нами были проведены эксперименты по пиролизическому синтезу углеродных наноструктур с использованием ультрамикродисперсного порошка оксида никеля, полученного электролизом [11–12]. Полученный углеродный наноматериал представляет собой конгломераты из нановолокон диаметром от 10 до 80 нм. Таким образом, была подтверждена возможность использования порошка оксида никеля синтезированного электрохимическим способом на переменном токе в каталитическом синтезе углеродных наноматериалов.

Установленные нами эффективные условия проведения препаративного электрохимического синтеза с учетом данных электронной микроскопии, рентгеноструктурных исследований легли в основу малоотходной технологической схемы производства ультрамикродисперсного порошка оксида никеля [9].

В таблице 1 приведены сравнительные данные о расходе реагентов и образующихся отходах в методах «электрохимического синтеза» и «мокрого сжигания».

Таким образом, разработанный нами способ и технологическая схема синтеза ультрамикродисперсного порошка оксида никеля на переменном синусоидальном токе позволяет снизить экологическую нагрузку производства углеродных наноматериалов каталитическим пиролизом углеводородов за счет исключения выброса в атмосферу поллютантов по сравнению с существующим традиционным способом, получения катализатора методом «мокрого» сжигания и значительным снижением затрат на утилизацию отходов производства.

### 1. Расход реагентов и количество отходов на получение 1 кг предкурсора никелевого катализатора

| Наименование сырья<br>(«электрохимический синтез») | Норма расхода, кг | Наименование сырья<br>(метод «мокрого сжигания»)                     | Норма расхода, кг | Отходы                   |                                         |
|----------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
|                                                    |                   |                                                                      |                   | электрохимический синтез | метод «мокрого сжигания»                |
| Гидроксид натрия<br>NaOH*                          | 2                 | Глицин<br>NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH                       | 2,40              | нет                      | 360 дм <sup>3</sup><br>NO <sub>2</sub>  |
| Никель Ni                                          | 0,59              | Нитрат магния<br>Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O | 0,48              |                          | 1672 дм <sup>3</sup><br>CO <sub>2</sub> |
| Уксусная кислота<br>CH <sub>3</sub> COOH*          | 0,1               | Нитрат никеля<br>Ni(NO <sub>3</sub> ) 6H <sub>2</sub> O              | 3,60              |                          |                                         |

\* Гидроксид натрия и уксусная кислота используются в рецикле.

#### *Список использованных источников*

1. Мележик, А. В. Синтез пористых углеродных нановолокон на катализаторах, полученных механохимическим методом / А. В. Мележик, Ю. И. Семенов, В. В. Янченко // Журнал прикладной химии. – 2005. – Т. 78, вып. 6. – С. 945 – 951.
2. Образцов, Д. В. Метод активного технологического контроля электрофизических параметров островковых пленочных катализаторов при вакуумном синтезе нанообъектов / Д. В. Образцов, В. Н. Чернышов, В. П. Шелохвостов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 15 – 24.
3. Образцов, Д. В. Метод и система активного технологического контроля синтеза нанообъектов / Д. В. Образцов, В. Н. Чернышов, В. П. Шелохвостов // Наноинженерия. – 2015. – № 8. – С. 27 – 32.
4. Чесноков, В. В. Особенности механизма образования углеродных нанонитей с различной кристаллографической структурой из углеводородов на катализаторах содержащих металлы подгруппы железа / В. В. Чесноков, Р. А. Буянов. // Серия. Критическиетехнологии. Мембраны. – 2005. – № 4(28). – С. 75 – 79.
5. Ermakova, M. A. Effective catalysts for direct cracking of methane to produce hydrogen and filamentous carbon. Part I. Nickel catalysts / M. A. Ermakova, D. Yu. Ermakov, G. G. Kuvshinov // Applied Catalysis. – 2000. – N 201. – P. 61.
6. Ermakova, M. A. Ni/SiO<sub>2</sub> and Fe/SiO<sub>2</sub> catalysts for production of hydrogen and filamentous carbon via methane decomposition / M. A. Ermakova, D. Yu. Ermakov // Catal. Today. – 2002. – N 77. – P. 225.
7. Шембель, Е. М. Электролитические оксиды никеля в электродах литиевых аккумуляторов / Е. М. Шембель, Р. Д. Апостолова, В. М. Нагирный // Электрохимия. – 2004 – № 1. – С. 45 – 53.
8. Котов, Ю. А. Характеристика порошков оксида никеля, полученных электрическим взрывом проволоки / Ю. А. Котов, А. В. Багазеев, И. В. Бекетов // Журнал технической физики – 2005 – № 10. – С. 45 – 49.
9. Патент на изобретение № 2428495, Российская Федерация, МПК7 С 22 В 23/00(2006.01), С 25 5/02 (2006.01). Способ получения ультрамикродисперсного порошка оксида никеля / Никифорова Е. Ю., Килимник А. Б. – Приоритет от 09.03.2010. Положительное решение 10.09.2011.
10. Килимник, А. Б. Установка для изучения электродных процессов на переменном токе // А. Б. Килимник, Е. Ю. Никифорова // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 16, № 1. – С. 74 – 79.
11. Шелохвостов, В. П. Разработка методики интеркалирования магнитных наночастиц в углеродные нанотрубки / В. П. Шелохвостов, В. Н. Чернышов, Р. В. Ежов, И. М. Маняхин, Д. В. Образцов // Вопросы современной науки и практики. Университет имени В. И. Вернадского. – 2009. – № 12(26). – С. 303 – 307.
12. Образцов, Д. В. Исследование продуктов пиролитического синтеза углеродных материалов / Д. В. Образцов, Х. Х. Саламех, В. П. Шелохвостов., М. В. Макаручук // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2010. – Т. 15, Вып. 1. – С. 238–239.

### References

1. Melezhik, A. V. Synthesis of porous carbon nanofibers on the catalysts prepared by mechanochemical cation / A. V. Melezhik, Yu. I. Sementsov, V. V. Yanchenko // *Journal of Applied Chemistry*. – 2005. – V. 78, N 6. – P. 945 – 951.
2. Obratsov, D. V. Active process control method of electro-physical parameters of islet film Catalysts under vacuum synthesis of nanoobjects / D. V. Obratsov, V. N. Chernyshov, V. P. Shelohvostov // *Bulletin TSTU*. – 2016. – V. 22, N 1. – P. 15 – 24.
3. Obratsov, D. V. The method and system of active technological control of the synthesis of nano-objects / D. V. Obratsov, V. N. Chernyshov, V. P. Shelohvostov // *Nanoengineering*. – 2015. – N 8. – P. 27 – 32.
4. Chesnokov, V. V. Features of the mechanism of formation of carbon nanowires with different-crystallographic structure of hydrocarbons on catalysts containing subgroup metals iron / V. V. Chesnokov, R. A. Brawlers // *Series. Critical technologies. Membrane*. – 2005. – N 4(28). – P. 75 – 79.
5. Ermakova, M. A. Effective catalysts for direct cracking of methane to produce hydrogen and filamentous carbon. Part I. Nickel catalysts / M. A. Ermakova, D. Yu. Ermakov, G. G. Kuvshinov // *Applied Catalysis*. – 2000. – N 201. – P. 61.
6. Ermakova, M. A. Ni/SiO<sub>2</sub> and Fe/SiO<sub>2</sub> catalysts for production of hydrogen and filamentous carbon via methane decomposition / M. A. Ermakova, D. Yu. Ermakov // *Catal. Today*. – 2002. – N 77. – P. 225.
7. Shembel, E. M. Electrolytic nickel oxide in the electrodes of lithium batteries / E. M. Shembel, R. D. Apostolov, V. M. Nagirny // *Electrochemistry*. – 2004. – N 1. – P. 45 – 53.
8. Kotov, Yu. A. Feature nickel oxide powders produced by electrical explosion of wire / Yu. A. Kotov, A. V. Bagazeev, I. V. Beketov // *Journal of physics technical* – 2005 – N 10. – P. 45 – 49.
9. Pat. for the invention № 2428495, the Russian Federation, MPK7 from 22 in 23/00 (2006.01), C 25 5/02 (2006.01). A method for producing ultramicro- dispersed powder of nickel oxide / Nikiforov E. Y., Kilimnik A. B. – The priority of 09.03.2010. The positive decision of 10.09.2011
10. Kilimnik, A. B. Installation for the study of electrode processes ac // A. B. Kilimnik, E. J. Nikiforov // *Vestnik Tambov State Technical University*. – 2010. – V. 16, N 1. – P. 74 – 79.
11. Shelohvostov, V. P. Development of the method of intercalation of magnetic nanoparticles in carbon nanotubes / V. P. Shelohvostov, V. N. Chernyshov, R. V. Yezhov, I. M. Manyahin, D. V. Obratsov // *Problems of modern science and practice. University named after Vernadsky*. – 2009. – N 12 (26). – P. 303 – 307.
12. Obratsov, D. V. Research products pyrolytic synthesis of carbon materials / D. V. Obratsov, H. H. Salameh, V. P. Shelohvostov., M. V. Makarchuk // *Vestnik Tambov State University*. – 2010 – V. 15, N 1. – P. 238–239.

УДК 355.585  
ББК 35.79

Орлова М. С., Пилягина А. О.  
ОАО «Корпорация «Росхимзащита»  
(Россия, г. Тамбов)

## ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД КАК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ВРЕДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

Orlova M. S., Pilyagina A. O.  
OJSC Corporation «Roshimzaschita»  
(Russia, Tambov)

### ELECTRICAL GAS DISCHARGE AS PROCESS TOOL OF AIR PURIFICATION FROM THE HARMFUL IMPURITIES

*Аннотация.* Представлены результаты анализа существующих методов очистки воздуха от вредных примесей в электрическом газовом разряде, дано краткое описание механизма ионизации воздуха и разрушения вредных примесей под воздействием электрического газового разряда, обосновано использование плазменно-каталитической технологии в качестве оптимального и комплексного решения вопросов очистки воздуха от вредных примесей.

*Ключевые слова:* электрический газовый разряд, вредные примеси, образование озона, плазменно-каталитическая технология, экотехнические системы

*Abstract.* Analysis results of existing methods of air purification from harmful impurities by applying an electrical gas discharge are represented, concise description of the air ionization mechanism and harmful impurities destruction after electrical gas discharge impact are given, applying the Plasma-catalytic technology as optimal and complex problem solution of air purification from the harmful impurities are justified.

*Keywords:* gas discharge, harmful impurities, ozone formation, Plasma-catalytic technology, eco-technical systems

Процессы экологической безопасности неразрывно связаны с освоением и применением экотехнических устройств и систем [1], призванных осуществлять высокоэффективную очистку воздуха от вредно действующих загрязнителей органического и неорганического происхождения. Особое место в современной практике воздухоочистки занимают технологии, основанные на использовании газового разряда.

Электрический газовый разряд – общепринятый способ получения плазмы в технике [2]. При приложении к газовому промежутку разности потенциалов в нем образуются заряженные частицы, создающие электрический ток. Разрядные процессы в газе, возникающие под действием электрического поля, характеризуются состоянием ионизации атомов и молекул электродами, а механизм передачи энергии электронов ней-

тральным молекулам основан на возбуждении молекулярных колебаний [3]. В результате газ становится ионизированным – от электронных оболочек значительной части атомов и молекул отделен, по крайней мере, один электрон. Известно, что частично или полностью ионизованный газ, который образован из нейтральных атомов (или молекул) и заряженных частиц (электронов и ионов), является плазмой.

Важным аспектом процесса обработки воздушного потока электрическим разрядом является нарушение внутримолекулярных связей в газовых составляющих воздуха с дальнейшим образованием озона, атомарного кислорода, возбужденного молекулярного кислорода, гидроксильных групп и ионов, обладающих высокой окислительной способностью. Указанная особенность находит практическое отражение в ряде технологий воздухоочистки, основанных на использовании газового разряда (рис. 1).

Принцип действия электростатических фильтров основан на придании электрического заряда аэрозолю, его осаждении с последующим сбором путем использования электрического заряда. Степень очистки воздуха подобными устройствами от дисперсных механических примесей достигает 95...99%, однако эти воздушные фильтры нерационально использовать при очистке от вредных газообразных загрязнителей, так как в данном случае они требуют подачи в зону реакции дополнительных газов-реагентов и оснащения дорогостоящими высокочастотными агрегатами питания [4].

В результате физико-химических реакций, протекающих между частями молекул загрязнений и продуктами электросинтеза воздуха, полученными в озонаторах, плазмохимических реакторах, газоразрядных ячейках, а также с помощью единичных изобретений, таких как [5, 6], происходит химическое окисление газообразных загрязнителей воздуха до менее вредных или безвредных соединений, вплоть до углекислого газа и воды.



Рис. 1. Технологии очистки воздуха в газовом электрическом разряде

Так, введение только озона ускоряет реакции окисления NO до NO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> до SO<sub>3</sub>, после озонирования аммиак, сероводород, метан, углекислый газ и меркаптаны переходят в сульфат аммония, углеаммиакаты, аммиачную селитру и кислород [7].

Несмотря на относительно малую энергоемкость и стоимость, озонаторы и устройства плазмохимической очистки имеют ряд ограничений, связанных с необходимостью термического или каталитического разложения остаточного озона, проведения специальной подготовки воздуха, контроля его влажности и запыленности.

Оптимальным решением очистки воздуха от вредных примесей являются устройства, применяющие нескольких стадий очистки поступающего воздуха: противопылевую, плазмохимическую, каталитическую. При попадании на катализатор озон, синтезируемый в разрядном блоке очистителя, распадается на активный атомарный и молекулярный кислород. Также благодаря глубокому окислению кислородом на катализаторе происходит разрушение остатков загрязняющих веществ (активных радикалов, возбужденных атомов и молекул), не уничтоженных в плазмохимическом реакторе.

Плазменно-каталитическая технология, включающая три стадии очистки воздуха, в России внедряется в современные экотехнические системы на протяжении 10 лет. Опыт промышленного использования установок на ее основе, а также результаты испытаний, показывают, что средняя степень подавления таких вредных веществ, как формальдегид, фенол, гексан, толуол, стирол, сероводород, ксилол, оксид углерода, бутанол, акролеин и других соединений, составляет от 90 до 98% [8]. На степень разложения поступающих на очистку органических веществ оказывают влияние состав и концентрации их смесей. Например, присутствие в смеси формальдегида, бензола, метанола (трудноокисляемых веществ) может снизить суммарную степень очистки на 5-10%, напротив, наличие эфиров и других легкоокисляемых веществ в очищаемой смеси повышает степень очистки на 5...10% [8].

Несмотря на схожесть технологического процесса, варианты представленных на рынке плазмокаталитических (газоразрядных) установок, газоконверторов имеют существенные конструктивные и функциональные отличия, что сказывается на технических характеристиках воздухоочистителей, затратах на их эксплуатацию. Как правило, данные устройства сконструированы по модульному принципу и могут очищать объемы воздуха до 100 000 м<sup>3</sup>/ч в зависимости от исполнения и потребностей заказчика, модификация катализатора, выполняющего финишную очистку от вредных веществ, как правило, определяется химическим составом очищаемого воздуха. Кроме электроэнергии установки для очистки воздуха плазменно-каталитическим методом не требуют дополнительных расходных материалов, сопутствующих приборов и предварительной подготовки воздушной среды.

Анализ достижений, представленных разработками и техническими решениями, раскрытыми в источниках патентной и технической информации, приводит к выводу, что принцип работы современных устройств по очистке воздуха от вредных примесей с использованием электрического газового разряда основан на сочетании нескольких методов очистки: химико-каталитического, адсорбционного, термического, озонного, электростатического, плазмохимического и других. Выбор оптимального вида электрического газового разряда для обработки воздушного потока и, соответственно, конструктивное исполнение разрядного блока очистителя, обеспечивает требуемую степень очистки в зависимости от конкретного уровня загрязненности воздуха и состава подлежащих удалению вредных примесей.

Устройства газоочистки, принцип работы которых частично или полностью основан на использовании электрического газового разряда, обеспечивают эффективную конверсию вредных веществ и повышают экологическую безопасность человека в целом.

#### *Список использованных источников*

1. Чекалов, Л. В. Практическая экотехника: электрическая и механическая очистка газов. Электрофильтры, матерчатые фильтры, циклоны. – Семибратово : Кондор-Эко, 2008. – 160 с.
2. Плазма [Электронный ресурс]. – URL : [www.krugosvet.ru](http://www.krugosvet.ru). – Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия.
3. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда. – М. : Наука. 1992. – 537 с.
4. Плазмокаталитическая очистка воздуха (газоочистка) [Электронный ресурс]. – URL : <http://ele-spb.ru> – ООО «Электроэкология».
5. Пат. РФ на полезную модель № 127324 МПК В01Д 53/32 (2006.01) Плазмохимический реактор для очистки воздуха / Ципкин В. Ю. ; Патентообладатель : Ципкин В. Ю. ; опубл. 27.04.2013.
6. Пат. РФ на полезную модель № 118569 МПК В03С 3/00 (2006.01) Установка для очистки газов и газоразрядный фильтр установки для очистки газов / Балин А. А., Сидоров И. О., Кузнецов Д. В. ; Патентообладатель: Фирма ООО «Фарм-Люкс» ; опубл. 27.07.2012.
7. Описание существующих методов очистки воздуха от вредных газообразных примесей [Электронный ресурс]. – URL : [www.air-cleaning.ru](http://www.air-cleaning.ru) – Воздухоочистка.
8. Петров, В. Ю. Современные достижения в области технологии плазменно-каталитической очистки воздуха (ООО «Электроэкология») // Сб. докладов четвертой междунар. конф. «Пылегазоочистка» : сб. ст. – М. : ООО «ИНТЕЭКО», 2011. – С. 25 – 29.

#### *References*

1. Chekalov, L. V. Practical Ekotekhnika: electrical and mechanical cleaning of gases Electrostatic precipitators, material filters, cyclones. – Semibratovo : Kondor-Eco, 2008. – 160 p.
2. The plasma [Electronic resource]. – URL : [www.krugosvet.ru](http://www.krugosvet.ru) – Universal Scientific-popular online-encyclopedia.
3. Raiser, Yu. P. Gas discharge physics. – M. : Nauka, 1992. – 537 p.
4. Plasma-catalytic air purification (gas cleaning) [Electronic resource]. – URL : <http://ele-spb.ru>- ООО “Elektroekologiya”.
5. Pat. N 127324 МПКВ01Д 53/32 (2006.01) (RU) Plasmachemical reactor to clean air / V. Yu. Zipkin ; The patent holder : V. Yu. Zipkin ; publ. 27.04.2013.
6. Pat. N 118569 МПКВ03С 3/00 (2006.01) (RU) Device for purification of gases and gas filter systems for gas purification / A. A. Balin, I. O. Sidorov, D. V. Kuznetsov ; The patent holder : Company ООО “Pharm-lux” ; publ. 27.07.2012.
7. Description of the existing methods of air purification from harmful gaseous impurities [Electronic resource]. – URL : [www.air-cleaning.ru](http://www.air-cleaning.ru) – Air cleaning.
8. Petrov, V. Yu. Modern achievements in the field of plasma-catalytic air cleaning technology (ООО “Elektroekologiya”) // Proceedings of the fourth international conference “Dust and Gas Cleaning”. – M. : ООО “INTEEKO”. – 2011. – 128 p.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ЭКСПЕРИМЕНТА В ЭКОЛОГИИ И ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

---

УДК 628.5

ББК Л455

Седых И. А., Шмырин А. М.

Липецкий государственный технический университет  
(Россия, г. Липецк)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВЫБРОСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЛИНКЕРА

Sedykh I. A., Shmyrin A. M.

Lipetsk State Technical University  
(Russia, Lipetsk)

## MATHEMATICAL MODELING OF THE MAXIMUM CONCENTRATIONS EMISSIONS FROM CLINKER PRODUCTION

*Аннотация.* Рассмотрена методика определения уровня максимальной концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе. Проведены расчеты максимальной концентрации выбросов пыли, угарного газа и диоксида азота из трубы вращающейся печи. Разработаны модели зависимости максимальной концентрации выбросов при производстве клинкера.

*Ключевые слова:* цементное производство, максимальная концентрация вредных веществ, математическая модель.

*Abstract.* The technique of determination of level of the maximum concentration of harmful substances in atmospheric air is considered. Calculations of the maximum concentration of emissions of dust, carbon monoxide and nitrogen dioxide from a pipe of the rotating furnace are carried out. Models of dependence of the maximum concentration of emissions by production of clinker are developed.

*Keywords:* cement production, the maximum concentration of harmful substances, the mathematical model.

**Введение.** Цементное производство является одним из сильнейших загрязнителей атмосферы. До 80% всей пыли, выбрасываемой в атмосферу при выработке цемента, производится клинкерообжигательными печами. Большое количество выбрасываемой цементной пыли несет значительную угрозу для окружающей среды, приводит к безвозвратным потерям продукции.

Для снижения вредной экологической нагрузки агрегаты цементных заводов оборудуются пылеулавливающими устройствами, которые не только предотвращают загрязнение прилегающей территории, но и возвращают в производство значительное количество цемента.

**Определение уровня максимальной концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе.** Рассмотрим методику расчета максимальной концентрации выбросов вредных веществ. Расчет уровня максимальной концентрации вещества в воздухе выполняется по формуле (1)[1].

$$C_m = \frac{AM \Gamma F m n}{H^2 \sqrt[3]{V_1 dT}}, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы;  $M$  – масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе;  $m$  и  $n$  – коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из источника;  $H$  – высота источника над уровнем земли, м;  $\Gamma$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;  $dT$  – разность между температурой выбрасываемой газовой смеси  $T$  и температурой окружающего атмосферного воздуха  $T_0$ , °C;  $V_1$  – расход газовой смеси, определяемой по формуле (2), м<sup>3</sup>/с.

$$V_1 = \frac{3,14 D^2}{4} \omega_0, \quad (2)$$

где  $D$  – диаметр источника, м;  $\omega_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси из устья источника, м/с.

Значения коэффициентов  $m$  и  $n$  определяются в зависимости от параметров  $f$ ,  $V_m$ ,  $V'_m$ ,  $f'_e$ :

$$f = 1000 \cdot \frac{\omega_0^2 D}{H^2 dT}, \quad (3)$$

$$V_m = 0,65 \cdot \sqrt[3]{\frac{V_1 dT}{H}}, \quad (4)$$

$$V'_m = 1,3 \cdot \frac{\omega_0 D}{H}, \quad (5)$$

$$f'_e = 800 \cdot (V'_m)^3. \quad (6)$$

Коэффициент  $m$  определяется в зависимости от  $f$  по формуле (7).

$$m = \begin{cases} \frac{1}{0,67 + 0,1 \cdot \sqrt{f} + 0,34 \cdot \sqrt[3]{f}}, & \text{если } f < 100; \\ \frac{1,47}{\sqrt[3]{f}}, & \text{если } f \geq 100. \end{cases} \quad (7)$$

Для  $f'_e < f < 100$  значение коэффициента  $m$  вычисляется при  $f = f'_e$ .

Коэффициент  $n$  при  $f < 100$  определяется в зависимости от  $V_m$  по формуле (8).

$$n = \begin{cases} 4,4 \cdot V_m, & \text{если } V_m < 1, \\ 0,532 \cdot V_m^2 - 2,13 \cdot V_m + 3,13, & \text{если } 0,5 \leq V_m < 2, \\ 1, & \text{если } V_m \geq 2. \end{cases} \quad (8)$$

При  $f \geq 100$  или  $dT \approx 0$  коэффициент  $n$  вычисляется при  $V_m = V'_m$ .

**Результаты расчетов максимальной концентрации выбросов.** В соответствии с описанной выше методикой проведены расчеты максимальной концентрации выбросов трех веществ (пыли, CO, NO<sub>2</sub>) из трубы вращающейся печи № 3 [2].

Для расчетов выбраны начальные данные:  $A = 180$ ,  $\Gamma = 1$ ,  $T_0 = 20,2$  °С (среднесуточная температура самого жаркого месяца),  $D = 4,8$  м,  $H = 100$  м,  $F_1 = 2$  (для пыли),  $F_2 = 1,1$  (для CO),  $F_3 = 1$  (для NO<sub>2</sub>).

По полученным данным функционирования вращающейся печи № 3 ЗАО «Липецкцемент» разработаны математические модели зависимости максимальной концентрации выбросов в атмосферу при производстве клинкера от наиболее существенных факторов: выпуска продукции и концентрации выбросов в трубе.

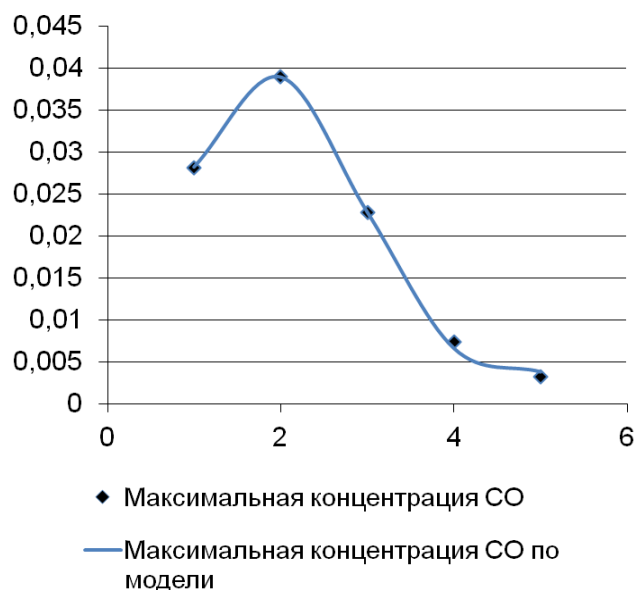
Максимальная концентрация пыли в атмосфере:

$$y_1 = -6,86 \cdot 10^{-7} + 3,51 \cdot 10^{-10} \cdot x_1 + 0,196 \cdot x_2, \quad (9)$$

где  $x_1$  – объем выработки клинкера вращающейся печью № 3, т;  $x_2$  – концентрация выбросов пыли в трубе печи № 3, г/м<sup>3</sup>,  $y_1$  – максимальная концентрация в атмосфере пыли. На рисунке 1. представлены исходные и модельные значения концентрации пыли по (9).



**Рис. 1. Максимальная концентрация пыли**



**Рис. 2. Максимальная концентрация CO**

Максимальная концентрация CO в атмосфере:

$$y_2 = -0,001713 + 0,016115045 \cdot x_3 + 1,86 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,28 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_3^2, \quad (10)$$

где  $x_3$  – концентрация выбросов пыли в трубе печи № 3;  $y_2$  – максимальная концентрация в атмосфере CO. На рисунке 2. представлены исходные и модельные значения концентрации CO по (10).

Максимальная концентрация NO<sub>2</sub> в атмосфере:

$$y_3 = 0,014168 - 2,49 \cdot 10^{-7} \cdot x_1 + 0,041349 \cdot x_4, \quad (11)$$

где  $x_4$  – концентрация выбросов NO<sub>2</sub> в трубе печи №3, г/м<sup>3</sup>,  $y_3$  – максимальная концентрация в атмосфере NO<sub>2</sub>. На рисунке 3. представлены исходные и модельные значения концентрации NO<sub>2</sub> по (11).



**Рис. 3. Максимальная концентрация NO<sub>2</sub>**

Коэффициент детерминации модели (9) равен 0,999, следовательно, вариация концентрации пыли на 99,9% объясняется изменчивостью включенных в модель переменных. Коэффициенты детерминации моделей (10) и (11) соответственно равны 0,992 и 0,989. Таким образом, что модели (9) – (11) эффективны для вычисления максимальной концентрации выбросов.

#### *Список использованных источников*

1. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86 : утв. Председателем Государственного комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 04.08.86. – Введен в действие 01.01.87. – Липецк : Гидрометеиздат, 1987. – 76 с.
2. Блюмин, С. Л. Окрестностное моделирование сетей Петри / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин, И. А. Седых, В. Ю. Филоненко. – Липецк : ЛЭГИ, 2010. – 124 с.

#### *References*

1. The method of calculation of concentrations in atmospheric air of harmful substances contained in emissions of the enterprises: OND-86 : approved. Chairman of the USSR State Committee for Hydrometeorology and environmental control 04.08.86. – Introduced 01.01.87. – Lipetsk : Gidrometeoizdat, 1987. – 76 p.
2. Blyumin, S. L. Okrestnostei simulation of Petri nets / S. L. Blyumin, A. M. Shmyrin, I. A. Sedykh, V. Yu. Filonenko. – Lipetsk : LEGI, 2010. – 124 p.

УДК 661.935  
ББК Л113.2

Акулинин Е. И., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И.  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КОРОТКОЦИКЛОВОЙ БЕЗНАГРЕВНОЙ АДСОРБЦИИ\*

Akulinin E. I., Dvoretzky D. S., Dvoretzky S. I.  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### MODELLING AND OPTIMIZATION OF AIR SEPARATION BY PRESSURE SWING ADSORPTION METHOD

*Аннотация.* Новый подход и методика расчета конструктивных и режимных переменных функционирования установки короткоциклового безнагревной адсорбции с использованием двумерной математической модели тепло- и массообменных процессов, в условиях неопределенности (неточности) некоторых коэффициентов математической модели и экспериментальных данных.

*Ключевые слова:* короткоцикловая безнагревная адсорбция, математическая модель, оптимизация в условиях неопределенности, конструктивные и режимные переменные.

*Abstract.* The a new approach and a method of calculation of design and regime variables of the functioning of the pressure swing adsorption units with two-dimensional mathematical model heat and mass – transfer processes have been proposed such as to allow for the unit's given capacity under uncertainty (inaccuracy) of some coefficients of the mathematical model and computational experiments' input data.

*Keywords:* pressure swing adsorption, mathematical model, optimization in uncertainties conditions, design and regime variables.

**Введение.** Значительная часть потребителей кислорода заинтересована в использовании не столько чистого кислорода, сколько воздуха, обогащенного кислородом до 30...90%. Это медицина, авиация (бортовые кислороддобывающие установки), целлюлозно-бумажная промышленность, системы аэрации промышленных и бытовых стоков, озонирования и т.д. Для этих потребителей использование обогащенного кислородом воздуха, получаемого путем совмещения метода низкотемпературной ректификации с разбавлением кислорода воздухом до требуемой концентрации является нерентабельным. Кроме того, остановка, пуск и выведение на рабочий режим крупной воздухоразделительной установки занимает десятки часов. В то же время некоторые потребители либо нуждаются в кислороде периодически, либо потребляют его неравномерно

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант р\_центр-а № 15-48-03172.

во времени. По этой и по некоторым другим причинам в последние годы все большее распространение получает адсорбционный метод разделения воздуха.

Принцип работы установок короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) заключается в циклическом чередовании осуществления процессов адсорбции азота из непрерывного воздушного потока и десорбции азота из адсорбента в параллельно работающих адсорберах; при этом формируется непрерывный поток обогащенного кислородом воздуха на выходе установки КБА. Наши исследования показали [1], что механизм процесса обогащения воздуха кислородом в установках КБА с блочными цеолитовыми адсорбентами типа X удовлетворительно согласуется с теорией объемного заполнения микропор академика М. М. Дубинина.

**Математическое описание процесса разделения воздуха методом КБА.** При адсорбции азота цеолитовым адсорбентом протекают следующие массо- и теплообменные процессы:

- а) диффузия азота в транспортных порах адсорбента;
- б) распространение тепла в воздушном потоке и адсорбенте;
- в) массообмен азотом и теплообмен между воздушным потоком и адсорбентом;
- г) адсорбция азота в микропорах сплошного цеолитового адсорбента с выделением тепла и десорбция азота из микропор с поглощением тепла.

Анализ результатов физического моделирования показал, что диффузия азота и распространение тепла в блочном адсорбенте осуществляется как в продольном, так и в поперечном направлениях относительно движения потока по высоте адсорбента, при этом лимитирующим процессом обогащения воздуха кислородом при адсорбции азота микропористым цеолитовым адсорбентом является процесс внешней массоотдачи, определяемый коэффициентом массоотдачи и величиной равновесной концентрации азота в адсорбенте.

При математическом описании процесса обогащения воздуха кислородом в установке КБА принимали следующие допущения:

- 1) адсорбционное равновесие описывается уравнением Дубинина – Радужкевича;
- 2) в качестве адсорбента используется сплошной пористый цеолитовый блок с относительным объемом (коэффициентом пористости)  $\varepsilon = 0,394$  и диаметром  $d_p \leq 0,5 \cdot 10^{-3}$  м транспортных пор;
- 3) движение потока воздуха в транспортных порах адсорбента осуществляется в диффузионном режиме, а обмен молекулами между газовой фазой и микропорами адсорбента осуществляется мгновенно;
- 4) высоту адсорбента  $H$  в адсорбере разбиваем на  $N$  элементарных слоев, каждый из которых рассматривается как объект с сосредоточенными координатами, т.е. концентрация адсорбированного азота и температура зависят только от времени;
- 5) адсорбцией кислорода из воздушного потока пренебрегаем;
- 6) коэффициенты продольной и радиальной диффузии азота в воздушном потоке зависят от температуры.

С учетом принятых допущений нами построена двухмерная математическая модель процесса обогащения воздуха кислородом, которая состоит из следующих уравнений [2].

1. Двухмерное дифференциальное уравнение в частных производных с начальными и граничными условиями, описывающее продольную и радиальную диффузию азота в транспортных порах адсорбента с учетом обмена молекулами между газовой фазой и микропорами адсорбента.

2. Дифференциальное уравнение кинетики адсорбции азота микропорами адсорбента.

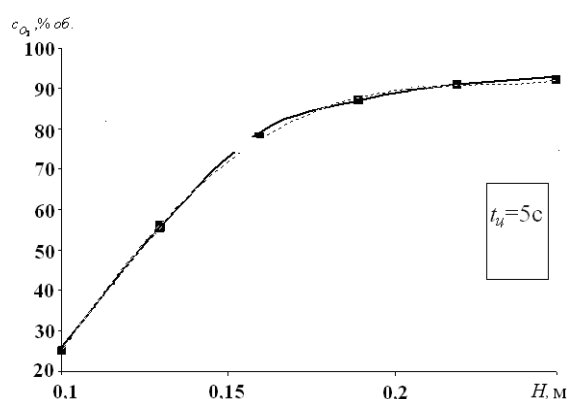
3. Двухмерные дифференциальные уравнения в частных производных с начальными и граничными условиями, описывающие распространение тепла в воздушном потоке и адсорбенте.

4. Дифференциальное уравнение, описывающее изменение скорости воздушного потока в транспортных порах адсорбента.

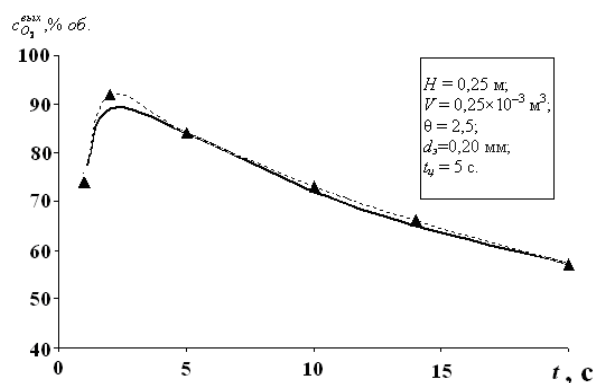
Двухмерная система дифференциальных уравнений математической модели процесса разделения воздуха методом КБА является нелинейной, поскольку коэффициенты уравнений зависят от текущих значений концентрации азота в воздушном потоке и температуры, соответственно. Для ее решения нами использовался метод конечных элементов, реализованный в виде алгоритма в программной среде Matlab.

Адекватность математической модели проверялась сравнением расчетных по модели (сплошные линии) и экспериментальных значений (штрих-пунктирные линии) концентрации кислорода в воздушном потоке по высоте адсорбента и на выходе из установки КБА, реализующей напорную схему с вакуумной десорбцией. Максимальное рассогласование расчетных по модели и экспериментальных значений концентрации кислорода на выходе из установки КБА, реализующей напорную схему с вакуумной десорбцией, в течение цикла работы не превышало 12% (рис. 1, 2).

**Исследование динамики процесса разделения воздуха в установке КБА методом вычислительного эксперимента.** Исследование динамики процесса обогащения воздуха кислородом проводилось в установке КБА с учетом того, что, концентрация кислорода в воздухе, подаваемом компрессором на обогащение в установку КБА, может изменяться случайным образом в пределах от 18 до 23% об.



**Рис. 1. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (штрих-пунктирная линия) зависимости концентрации кислорода  $c_{O_2}$  по высоте блочного адсорбента LiLSX**



**Рис. 2. Расчетная (сплошная линия) и экспериментальная (штрих-пунктирная линия) зависимости концентрации кислорода  $c_{O_2}$  на выходе установки КБА от времени**

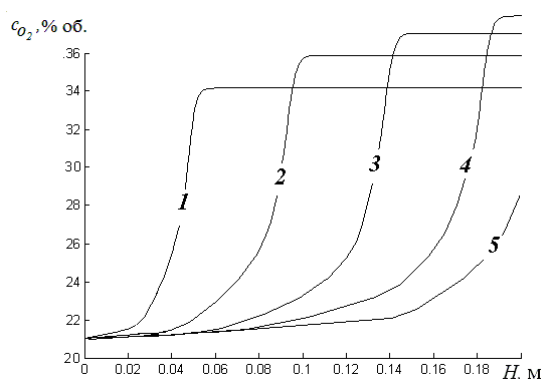
Аналогичным образом могут изменяться предельный адсорбционный объем цеолитового адсорбента  $W_0$  – от  $1,6 \cdot 10^{-4}$  до  $2,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг и значение коэффициента массоотдачи  $\beta$  азота – от 1,2 до  $1,8 \cdot 10^{-5}$  1/с, т.е.  $\xi = \{c_{O_2}^{BX}, W_0, \beta\}$ .

На рисунках 3, 4 приведены профили концентрации кислорода в воздушном потоке по высоте адсорбента при адсорбции в зависимости от времени в 1-м и 18-м циклах.

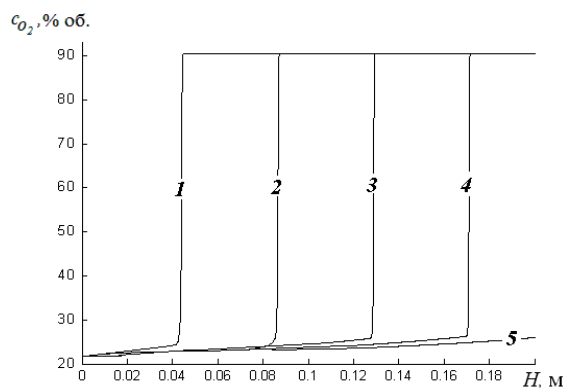
На рисунке 5 приведена зависимость концентрации кислорода  $c_{O_2}$ , % об. в газовой фазе и аэродинамического сопротивления адсорбента  $\Delta P$  от величины отношения высоты слоя адсорбента  $H$  к его диаметру  $D$  в адсорбере.

Из анализа графиков на рис. 5 следует, что максимальная концентрация кислорода  $c_{O_2}^{max}$ , % об. достигается при величинах  $H/D$  в диапазоне значений 4 – 6, а при  $H/D > 8$  сопротивление слоя монотонно возрастает, что приводит к снижению  $P_{ад}$  и, следовательно, к уменьшению концентрации кислорода на выходе из установки КБА.

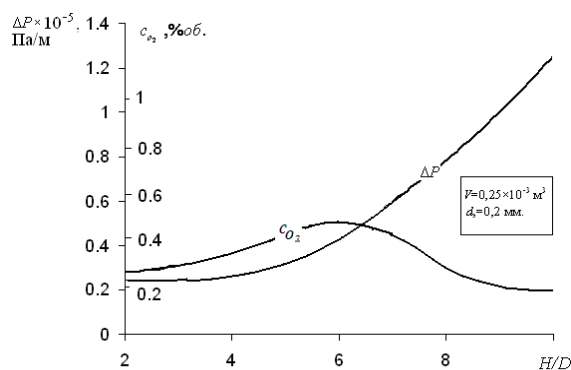
На рисунке 6 приведена зависимость распределения скорости воздушного потока по высоте адсорбента от времени в 1-м цикле.



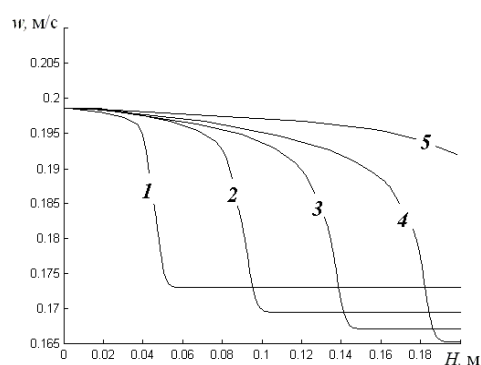
**Рис. 3. Динамика изменения профиля концентрации кислорода в газовой фазе при адсорбции в 1 цикле:**  
1 – 0,2 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,6 с; 4 – 0,8 с; 5 – 1,0 с



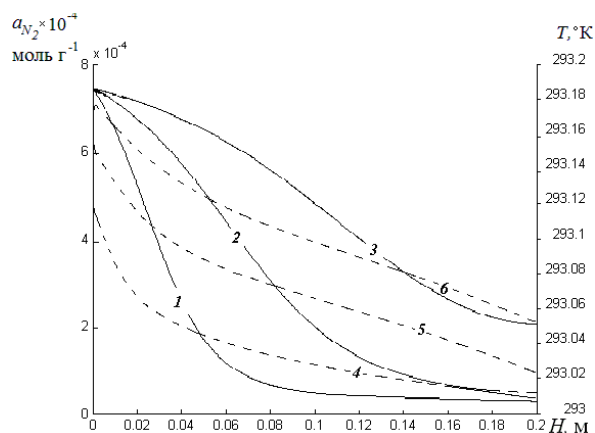
**Рис. 4. Динамика изменения профиля концентрации кислорода в газовой фазе при адсорбции в 18 цикле:**  
1 – 0,2 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,6 с; 4 – 0,8 с; 5 – 1,0 с



**Рис. 5. Изменение  $c_{O_2}$ , % об. и аэродинамического сопротивления слоя адсорбента  $\Delta P$  в зависимости от отношения высоты  $H$  к диаметру  $D$  адсорбента в адсорбере**



**Рис. 6. Скорость газового потока при адсорбции в 1 цикле по высоте адсорбента от времени  $t$ :**  
1 – 0,2 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,6 с; 4 – 0,8 с; 5 – 1,0 с



**Рис. 7. Динамика изменения  
профиля концентрации кислорода  
в газовой фазе и температуры  
адсорбента при адсорбции в 1-м цикле:**  
1 – 0,2 с; 2 – 0,4 с; 3 – 0,6 с; 4 – 0,8 с; 5 – 1,0 с

Анализ температурных профилей по высоте адсорбента при адсорбции и десорбции азота (рис. 7) показывает, что в течение цикла происходит некоторое накопление тепла в слое. При этом тепловой фронт движется за адсорбционным и при большом количестве циклов адсорбент будет нагреваться до определенной температуры что является причиной ухудшения его адсорбционной способности. Однако нагрев адсорбента за один цикл незначителен ( $\sim 0,2^\circ\text{C}$ ), а при длительной работе установки КБА наблюдаемое снижение концентрации кислорода в воздушном потоке не превышает 5%. Для достижения максимальной концентрации кислорода, равной 90,7% требуется не менее 18 циклов.

Анализ результатов вычислительного эксперимента также показывает, что влияние продольной и поперечной диффузии на скорость адсорбции азота незначительно, и в практических расчетах диффузионными составляющими можно пренебречь. Кроме того, при  $P_{\text{ад}} = 1,5 \cdot 10^5$  Па на стадии адсорбции азота на 5...6% снижается объемный расход и скорость газового потока, а на стадии десорбции при  $P_{\text{дес}} = 0,5 \cdot 10^5$  Па расход и скорость потока соответственно возрастают. Наблюдается также возрастание плотности воздушного потока на стадии адсорбции азота и соответственно ее уменьшение на стадии десорбции азота за счет увеличения на стадии адсорбции и уменьшения на стадии десорбции доли кислорода в воздушном потоке.

Методами вычислительного эксперимента и физического экспериментов также установлено, что концентрация кислорода на выходе установки КБА повышается до максимального значения  $c_{\text{O}_2}^{\text{вых}} = 91,1\%$  при числе циклов адсорбции-десорбции  $n > 18$  и времени цикла  $t_{\text{ц}} = 1,6$  с. При этом установка КБА выходит на устойчивый режим работы, т.е. достигается динамическое равновесие тепло- и массообменных процессов, а фронты адсорбции и десорбции приобретают вид стоячих волн. При числе циклов адсорбция-десорбция  $n > 100$  адсорбент нагревается до  $\sim 45^\circ\text{C}$ , а концентрация кислорода в воздушном потоке снижается до 90%.

**Аппаратурно-технологическое оформление процесса разделения воздуха в условиях неопределенности.** Задача оптимального проектирования установки КБА обогащения воздуха кислородом формулируется следующим образом. Для заданного типа аппаратного оформления  $a \in A$  установки КБА при заданных значениях производи-

тельности  $Q_{\text{зад}}$  и концентрации кислорода  $c_{\text{O}_2}^{\text{вых}}$  на выходе из установки требуется оп-  
ределить конструктивные параметры (тип  $b \in B$  адсорбента, высоту слоя  $H$  адсорбента,  
диаметр  $D$  адсорбера) и режимные переменные (значения давлений  $P_{\text{ад}}$ ,  $P_{\text{дес}}$ , длитель-  
ность цикла  $t_{\text{ц}}$ , коэффициент рецикла  $\theta$ ), при которых достигается минимум приведен-  
ных затрат ПЗ на создание установки КБА. При этом, как было упомянуто выше, часть  
исходных данных для проектирования является неопределенной, такие как, concentra-  
ция  $c_{\text{O}_2}^{\text{вх}}$  кислорода в воздухе, подаваемом компрессором на обогащение в адсорбер,  
предельный адсорбционный объем  $W_0$  цеолитового адсорбента, значение коэффициен-  
та массоотдачи  $\beta$  (все они изменяются случайным образом в заданных пределах: от 18  
до 23% об., от  $1,6 \cdot 10^{-4}$  до  $2,3 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг, от 1,2 до  $1,8 \cdot 10^{-5}$  1/с, соответственно).

Для сокращения записи математических формул введем следующие обозначения:  
 $q$  – вектор, включающий варианты конструктивного исполнения концентратора кисло-  
рода и типа адсорбента, т.е.  $q = (a, b)$ ;  $d$  – вектор конструктивных параметров, т.е.  
 $d = (H, D)$ ;  $z$  – вектор режимных (управляющих) переменных, т.е.  $z = (P_{\text{ад}}, P_{\text{дес}}, t_{\text{ц}}, \theta)$ .

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$E_{\xi} \{ \text{ПЗ}(q, d, z, \xi) \} \rightarrow \rightarrow \min_{q, d, z}, \quad (10)$$

при связях в форме дифференциальных уравнений с частными производными матема-  
тической модели процесса обогащения воздуха кислородом (1) – (5), (6) – (9) и ограни-  
чениях:

– на производительность установки:

$$\text{Pr}_{\xi} [(Q_{\text{зад}} - Q(q, d, z, \xi)) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}}; \quad (11)$$

– на концентрацию кислорода на выходе установки

$$\text{Pr}_{\xi} \{ ([c_{\text{O}_2}^{\text{вых}}]_{\text{зад}} - c_{\text{O}_2}^{\text{вых}}(q, d, z, \xi)) \leq 0 \} \geq \rho_{\text{зад}}; \quad (12)$$

– на массу и габариты адсорберов установки

$$\text{Pr}_{\xi} [(\hat{M}_{\text{ад}} - M_{\text{ад}}(q, d, z, \xi)) \leq 0] \geq \rho_{\text{зад}}; \quad (13)$$

$$k_p = P_{\text{ад}}/P_{\text{дес}} \leq \hat{k}_p, \quad H \leq \hat{H}, \quad D \leq \hat{D}; \quad (14)$$

где  $E_{\xi} \{ \cdot \}$  – математическое ожидание целевой функции  $\{ \cdot \}$ ;  $\hat{k}_p$ ,  $\hat{H}$ ,  $\hat{D}$ ,  $\hat{M}_{\text{ад}}$  – макси-  
мально допустимые значения коэффициента отношения давлений адсорбции-  
десорбции

$k_p = P_{\text{ад}}/P_{\text{дес}}$ , габаритов адсорберов установки КБА (высоты  $\hat{H}$  и диаметра  $\hat{D}$  адсорбе-  
ра), массы адсорбера  $\hat{M}_{\text{ад}}$ ;  $\text{Pr}_{\xi} \{ \cdot \}$ ,  $\rho_{\text{зад}}$  – вероятность и гарантированное значение веро-  
ятности выполнения ограничения  $\{ \cdot \}$ , соответственно.

Сформулированная задача (10) – (14) относится к классу одноэтапных задач нели-  
нейного программирования с мягкими ограничениями при наличии неопределенности,  
для решения которой нами разработан оригинальный алгоритм [4].

**Заключение.** Методом вычислительного эксперимента с использованием двухмерной математической модели циклических адсорбционных процессов установлено, что величина  $ПЗ$  в наибольшей степени зависит от коэффициентов рецикла  $\theta$  и отношения давлений на стадиях адсорбции и десорбции  $k_p = P_{ад}/P_{дес}$ . Так, при увеличении величины  $k_p$  в два раза (от  $k_p = 3$  до  $k_p = 6$ ) значение целевой функции  $ПЗ$  увеличивается на 30,5%, а при аналогичном увеличении коэффициента рецикла  $\theta$  – на 23%. Таким образом, снижение величины  $ПЗ$  при проектировании установки КБА в первую очередь связано с уменьшением величин  $\theta$  и  $k_p = P_{ад}/P_{дес}$ . Потребляемая мощность  $N$  установки определяется в основном мощностью компрессора, которая также зависит от величин  $\theta$ ,  $P_{ад}$ ,  $P_{дес}$ . Следовательно, минимизация величины  $ПЗ$  при проектировании установки КБА будет также способствовать и снижению потребляемой мощности, т.е. энергосбережению при обогащении воздуха кислородом.

Анализ полученного решения задачи оптимального проектирования установки КБА при обогащении воздуха кислородом показывает, что масса концентратора и его энергопотребление могут быть снижены на 25 и 20%, соответственно, по сравнению с существующими мировыми аналогами.

#### *Список использованных источников*

1. Акулинин, Е. И. Дис. ... канд. тех. наук / Тамбовский гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2010. – 165 с.
2. Акулинин, Е. И., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Туголуков Е. Н. // Хим. технология. – Москва, 2008. – Т.13, № 4. – С. 247 – 256.
3. Акулинин, Е. И., Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Ермаков А. А., Симаненков С. И. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов, 2009. – Т. 15, № 2. – С. 341 – 355.
4. Дворецкий, Д. С. Новые подходы к проектированию химико-технологических процессов, аппаратов и систем в условиях интервальной неопределенности : монография / Д. С. Дворецкий, С. И. Дворецкий, Г. М. Островский. – М. : «Спектр», 2012. – 344 с.

#### *References*

1. Akulinin, E. I. Dissertation of Ph. D. TSTU. – Tambov, 2010. – 165 p.
2. Akulinin, E. I., Dvoretzky D. S., Dvoretzky S. I., Tugolukov E. N. // Chemical technology. – Moscow, 2008. – V. 13, № 4. – P. 247 – 256.
3. Akulinin E. I., Dvoretzky D. S., Dvoretzky S. I., Ermakov A. A., Simanenkova S. I. // Transaction TSTU. – Tambov, 2009. – V. 15, № 2. – P. 341 – 355.
4. Dvoretzky D. S. The new approach of designing chemical and technological processes, apparatus and systems under uncertainty conditions : monograph / D. S. Dvoretzky, S. I. Dvoretzky, G. M. Ostrovsky. – M. : “Spectr”, 2012. – 344 p.

УДК 66.074.3  
ББК О563+Л113.2

Дворецкий Д. С., Дворецкий С. И., Акулинин Е. И., Плотников М. Ю., Толстых С. Г.  
НОЦ «Новые химические технологии»  
ФГБОУ ВО «ТГТУ» – ОАО «Корпорация «Росхимзащита»  
(Россия, г. Тамбов)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ВОЗДУХА В ГЕРМЕТИЧНЫХ ОБИТАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ

Dvoretzky D. S. , Dvoretzky S. I., Akulinin E. I., Plotnikov M. Yu., Tolstyh S. G.  
REC “New Chemical Technology”  
Tambov State Technical University – OJSC “Corporation “Roshimzachita”  
(Russia, Tambov)

### MODELLING OF NONSTATIONARY AIR CHEMISORPTION REGENERATION IN SEALED VOLUME

*Аннотация.* В работе приводятся уравнения математического описания нестационарного процесса хемосорбции кристаллами  $\text{KO}_2$  (осажденными на волокнах высокопористой матрицы) диоксида углерода и выделения  $\text{O}_2$  в присутствии паров воды, осуществляемого в хемосорбционном реакторе специальной конструкции. Методом математического моделирования исследуется влияние тепло- и массообменных процессов, сопровождающих процесс хемосорбции, на кинетику и экономичность его осуществления в хемосорбционном реакторе. Разработан алгоритм расчета времени защитного действия и конструктивных переменных реактора с заданным временем защитного действия в условиях неопределенности (неточности) некоторых коэффициентов математической модели процесса химической регенерации воздуха и исходных данных при проведении вычислительных экспериментов.

*Ключевые слова:* химическая регенерация воздуха, хемосорбция, надпероксид калия, диоксид углерода, кислород, математическая модель, время защитного действия, вычислительный эксперимент.

*Abstract.* The mathematical description of the carbon dioxide nonstationary chemisorption and allocation of  $\text{O}_2$  process in special design chemisorption reactor by  $\text{KO}_2$  crystals (precipitated on the fibers highly porous matrix) of in the water vapor, carried out. Relationships of heat and mass transfer processes in chemisorption reactor and kinetics and efficiency with mathematical modelling was researched. The algorithm of time of protective and the constructive variables of the reactor calculation in uncertainty (inaccuracy) of some coefficients of the mathematical model and input data of the process of air chemical regeneration was offered.

*Keywords:* air chemical regeneration, chemisorption, superoxides of potassium, carbon dioxide, oxygen, mathematical model, time of protective, computing experiment.

**Введение.** Регенерация воздуха методом хемосорбции представляет собой нестационарный физико-химический процесс, включающий хемосорбцию *надпероксидом калия* ( $\text{KO}_2$ ) *диоксида углерода* ( $\text{CO}_2$ ), выделяемого при дыхании людей, и поддержании

концентраций *кислорода* ( $O_2$ ) и  $CO_2$  в регенерируемом воздухе в пределах 19...23% об. и не более 1% об., соответственно. Регенерация воздуха осуществляется в системах жизнеобеспечения, представляющих собой единый компактный комплекс, в котором реализуются одновременно процессы удаления  $CO_2$  и выделение  $O_2$  в хемосорбционном реакторе с саморегулированием процесса химического состава регенерируемого воздуха без использования средств автоматизации [1].

В ОАО «Корпорация «Росхимзащита» разработана технология получения регенеративного продукта различной геометрической формы (РПК-П ТУ 2123-232-05807954-2008) с максимально развитой поверхностью и регулируемым содержанием активного кислорода [2]. Регенеративный продукт, получаемый по этой технологии, представляет собой *нанокристаллический надпероксид калия*, закрепленный на волокнах и поверхности пор волокнистой и инертной к щелочному раствору пероксида водорода матрицы. Новая технология обеспечивает возможность получения не только чистого надпероксида калия на матрице, но и различных модификаций составов на его основе. В состав регенеративного продукта РПК-П входят:  $KO_2$  – 63% вес.,  $KOH$  – 25,2% вес.,  $K_2CO_3$  – 1,8 % вес., остальное – пористая стекловолокнистая матрица.

**Постановка задачи исследования.** Целью проводимых теоретических и экспериментальных исследований системных закономерностей, связей и особенностей протекания процесса химической регенерации воздуха в хемосорбционном реакторе специальной конструкции, размещенном в герметичном обитаемом объекте, является:

1) экспериментальное изучение кинетики хемосорбции кристаллами  $KO_2$  (осажденными на волокнах высокопористой матрицы) *диоксида углерода* и выделения  $O_2$  в присутствии паров воды;

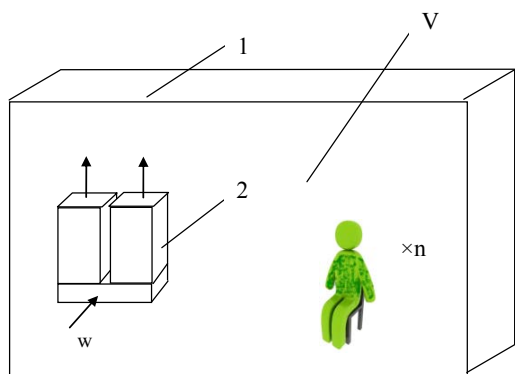
2) изучение методом математического моделирования влияния тепло- и массообменных процессов, сопровождающих процесс хемосорбции, на кинетику и экономичность его осуществления в хемосорбционном реакторе;

3) разработка алгоритма расчета времени защитного действия (ВЗД) регенеративного продукта хемосорбционного реактора, в течение которого при заданных объеме, площади поверхности хемосорбента и количестве людей, находящихся в герметичном обитаемом объекте, обеспечивается содержание кислорода и диоксида углерода в воздухе на комфортном для дыхания человека уровне (не менее 19% объемных по *кислороду* и не более 1% по *диоксиду углерода*);

4) разработка нового подхода (методики) к расчету конструктивных переменных хемосорбционного реактора с заданным ВЗД в условиях неопределенности (неточности) некоторых коэффициентов математической модели процесса химической регенерации воздуха и исходных данных при проведении вычислительных экспериментов.

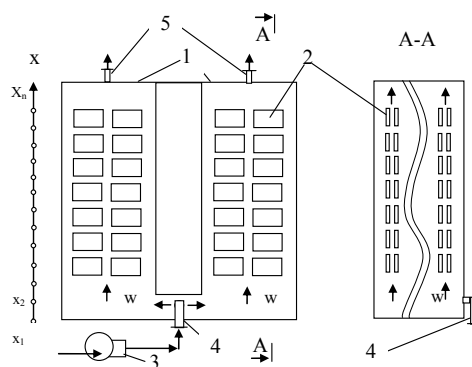
**Математическое описание динамики процессе химической регенерации воздуха в герметичном обитаемом объекте.** При регенерации воздуха протекает несколько параллельно протекающих процессов: *в герметичном обитаемом объекте* (рис. 1) – выделение  $CO_2$ , тепла и потребление  $O_2$  в воздухе людьми в результате их жизнедеятельности; *в хемосорбционном реакторе* (рис. 2):

1) процесс диффузии молекул  $CO_2$  и  $H_2O$  из потока регенерируемого воздуха к кристаллам  $KO_2$ , осажденным на волокнах высокопористой матрицы;



**Рис. 1. Размещение хемосорбционного реактора в герметично замкнутом объеме:**

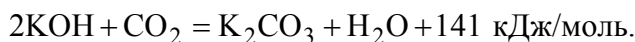
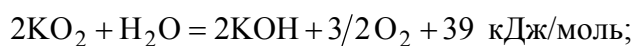
1 – герметично-замкнутый объем;  
2 – хемосорбционный реактор



**Рис. 2. Схема движения газозвдушного потока в хемосорбционном реакторе:**

1 – рукава; 2 – пластины хемосорбента;  
3 – вентильатор; 4 – штуцер подачи ГДС;  
5 – штуцер отвода ГДС

2) химическое взаимодействие  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с  $\text{KO}_2$  и выделение  $\text{O}_2$  в слое хемосорбента в соответствии с химическими реакциями:



3) диффузия молекул кислорода из рабочего слоя хемосорбента в поток ГДС.

Взаимодействие диоксида углерода и воды с надпероксидом калия представляет собой топахимическую реакцию, которая осуществляется на твердой поверхности хемосорбента с участием твердого вещества (кристаллов  $\text{KO}_2$ ), газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) и жидкости ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KOH}$ ). Специфика топахимических реакций в ряду других гетерогенных процессов обусловлена тем, что поверхность раздела фаз возникает в результате самой реакции и изменяется во времени [3].

При разработке математического описания процесса регенерации воздуха в герметичном обитаемом объекте принимали следующие допущения.

1. Герметичный обитаемый объект может быть разделен на три зоны: I – зона выхода регенерируемого воздуха из реактора; II – зона жизнедеятельности людей, укрываемых в объекте; III – зона входа воздуха в реактор. В этом случае гидродинамический режим движения воздуха в герметичном объеме соответствует 3-х ячеечной модели смешения.

2. Гидродинамический режим движения регенерируемого воздуха между навесками хемосорбента в реакторе соответствует модели идеального вытеснения.

3. Обмен молекулами  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  из поверхностного слоя воздуха с кристаллами- $\text{KO}_2$ , осажденными на волокнах высокопористой матрицы, осуществляется мгновенно. При этом лимитирующим процессом процесса регенерации воздуха являются химические реакции (1), (2), скорости которых описываются кинетическими уравнениями второго порядка.

4. Пластина хемосорбента представляет собой высокопористую однородную среду с шириной, высотой и толщиной рабочего слоя  $b$ ,  $a$  и  $\gamma$ , соответственно. Считаем, что

пластина хемосорбента состоит из  $N_i$  слоев (по координате  $x$ ) с высотой  $\delta x_i = x_{i+1} - x_i$ . Концентрации веществ  $\text{CO}_2$  и  $\text{KOH}$  в  $i$ -м рабочем слое хемосорбента считаем постоянными.

5. Герметично обитаемый объект теплоизолирован.

С учетом принятых допущений инегро-интерполяционным методом получали уравнения математического описания процессов, происходящих в хемосорбционном реакторе (рис. 2) [4].

Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  и паров  $\text{H}_2\text{O}$  в потоке воздухе по высоте пластин хемосорбента описываются дифференциальными уравнениями вида (1) – (3):

$$w \frac{\partial c_{\text{CO}_2}(x, t)}{\partial x} - \frac{2\gamma}{d} W_2(a_{\text{KOH}}^{i(x)}(t), c_{\text{CO}_2}^{i(x)}(t), T_x^{i(x)}(t)) = \frac{\partial c_{\text{CO}_2}(x, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$w \frac{\partial c_{\text{O}_2}(x, t)}{\partial x} + \frac{2\gamma}{d} W_1(a_{\text{KOH}}^{i(x)}(t), c_{\text{H}_2\text{O}}^{i(x)}(t), T_x^{i(x)}(t)) = \frac{\partial c_{\text{O}_2}(x, t)}{\partial t}, \quad (2)$$

$$w \frac{\partial c_{\text{H}_2\text{O}}(x, t)}{\partial x} - \frac{2\gamma}{d} W_1(a_{\text{KOH}}^{i(x)}(t), c_{\text{H}_2\text{O}}^{i(x)}(t), T_x^{i(x)}(t)) - \\ - W_2(a_{\text{KOH}}^{i(x)}(t), c_{\text{CO}_2}^{i(x)}(t), T_x^{i(x)}(t)) = \frac{\partial c_{\text{H}_2\text{O}}(x, t)}{\partial t} \quad (3)$$

с начальными

$$c_{\text{CO}_2}(x, 0) = c_{\text{CO}_2}^0(x), \quad c_{\text{O}_2}(x, 0) = c_{\text{O}_2}^0(x), \quad c_{\text{H}_2\text{O}}(x, 0) = c_{\text{H}_2\text{O}}^0(x),$$

и граничными условиями при  $x = 0$ :

$$c_{\text{CO}_2}(0, t) = c_{\text{CO}_2}^{\text{BX}}, \quad c_{\text{O}_2}(0, t) = c_{\text{O}_2}^{\text{BX}}, \quad c_{\text{H}_2\text{O}}(0, t) = c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{BX}}.$$

Изменение концентраций  $a_{\text{KOH}}^{i(x)}$ ,  $a_{\text{KOH}}^{i(x)}$  в  $i$ -м элементарном слое хемосорбента описывается уравнениями химической кинетики (4), (5):

$$\frac{da_{\text{KOH}}^{i(x)}}{dt} = -W_1 = -k_1(T_x^{i(x)}) a_{\text{KOH}}^{i(x)} c_{\text{H}_2\text{O}}^{i(x)}, \quad (4)$$

$$\frac{da_{\text{KOH}}^{i(x)}}{dt} = W_1 - W_2 = k_1(T_x^{i(x)}) a_{\text{KOH}}^{i(x)} c_{\text{H}_2\text{O}}^{i(x)} - k_2(T_x^{i(x)}) c_{\text{CO}_2}^{i(x)} a_{\text{KOH}}^{i(x)}, \quad (5)$$

где  $c_{\text{CO}_2}^{i(x)} = \frac{c_{\text{CO}_2, i} + c_{\text{CO}_2, i-1}}{2}$ ;  $c_{\text{H}_2\text{O}}^{i(x)} = \frac{c_{\text{H}_2\text{O}, i} + c_{\text{H}_2\text{O}, i-1}}{2}$ ;

с начальными условиями:  $a_{\text{KOH}}^{i(x)}(0) = a_{\text{KOH}}^{i(x)0}$ ,  $a_{\text{KOH}}^{i(x)}(0) = a_{\text{KOH}}^{i(x)0}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Изменение температуры ГДС и хемосорбента по его высоте записывается в следующем виде:

$$c_p^g \rho_g w \frac{\partial T_g(x, t)}{\partial x} - \frac{2\alpha}{d} [T_g^{i(x)}(x, t) - T_x^{i(x)}(t)] = c_p^g \rho_g \frac{\partial T_g(x, t)}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\alpha}{\gamma} \left[ T_x^{i(x)}(t) - T_g^{i(x)}(x, t) \right] + \\
& + \left( h_1 W_1 (a_{\text{KOH}_2}^{n_{\text{KOH}_2} i(x)}(t), c_{\text{H}_2\text{O}}^{n_{\text{H}_2\text{O}} i(x)}(t)) + h_2 W_2 (c_{\text{CO}_2}^{n_{\text{CO}_2} i(x)}(t), a_{\text{KOH}}^{n_{\text{KOH}} i(x)}(t)) \right) = c_{px} \rho_x \frac{\partial T_x}{\partial t}(x, t) .
\end{aligned} \tag{7}$$

с начальными и граничными условиями:

$$T_g(x, 0) = T_g^0(x), \quad T_x(x, 0) = T_x^0(x) .$$

и граничными условиями при  $x = 0$ :

$$T_x(0, t) = T_g(0, t) = T_g^{\text{BX}}(t) .$$

где  $w$  – скорость потока ГДС,  $\text{м}^3/\text{с}$  .

Изменение концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , паров  $\text{H}_2\text{O}$  и температуры в герметичном обитаемом объекте описывается системой дифференциальных уравнений (8) – (11):

$$\begin{aligned}
V_{\text{ГО}}^{(1)} \frac{d\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(1)}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (c_{\text{CO}_2}^{\text{ВЫХ}}(t) - \bar{c}_{\text{CO}_2}^{(1)}(t)), \\
V_{\text{ГО}}^{(2)} \frac{d\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(1)}(t) - \bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t)) + n g_{\text{чел}}^{\text{CO}_2},
\end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
V_{\text{ГО}}^{(3)} \frac{dc_{\text{CO}_2}^{\text{BX}}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t) - c_{\text{CO}_2}^{\text{BX}}(t)), \\
V_{\text{ГО}}^{(1)} \frac{d\bar{c}_{\text{O}_2}^{(1)}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (c_{\text{O}_2}^{\text{ВЫХ}}(t) - \bar{c}_{\text{O}_2}^{(1)}(t)), \\
V_{\text{ГО}}^{(2)} \frac{d\bar{c}_{\text{O}_2}^{(2)}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{O}_2}^{(1)}(t) - \bar{c}_{\text{O}_2}^{(2)}(t)) - n g_{\text{чел}}^{\text{O}_2},
\end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
V_{\text{ГО}}^{(3)} \frac{dc_{\text{O}_2}^{\text{BX}}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{O}_2}^{(2)}(t) - c_{\text{O}_2}^{\text{BX}}(t)), \\
V_{\text{ГО}}^{(1)} \frac{d\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ВЫХ}}(t) - \bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}(t)), \\
V_{\text{ГО}}^{(2)} \frac{d\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(1)}(t) - \bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)}(t)),
\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
V_{\text{ГО}}^{(3)} \frac{dc_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{BX}}(t)}{dt} &= G_{\text{см}} (\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)}(t) - c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{BX}}(t)), \\
c_p^g \rho_g V_{\text{ГО}}^{(1)} \frac{\partial T_{\text{ГО}}^{(1)}(t)}{\partial t} &= c_p^g \rho_g G_{\text{см}} (T_g^{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ГО}}^{(1)}), \\
c_p^g \rho_g V_{\text{ГО}}^{(2)} \frac{\partial T_{\text{ГО}}^{(2)}(t)}{\partial t} &= c_p^g \rho_g G_{\text{см}} (T_{\text{ГО}}^{(1)} - T_{\text{ГО}}^{(2)}) + Q_{\Sigma},
\end{aligned} \tag{11}$$

$$c_p^g \rho_g V_{\text{ГО}}^{(3)} \frac{\partial T_g^{\text{BX}}(t)}{\partial t} = c_p^g \rho_g G_{\text{см}} (T_{\text{ГО}}^{(2)} - T_g^{\text{BX}}),$$

где  $Q_{\Sigma}$  – суммарные на герметично обитаемый объект тепловыделения, Вт;

$$Q_{\Sigma} = Q_1 + Q_2 + Q_3 ,$$

с начальными условиями:

$$\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(1)}(0) = \bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(0) = c_{\text{CO}_2}^{\text{BX}}(0) = \bar{c}_{\text{CO}_2}^0,$$

$$\bar{c}_{\text{O}_2}^{(1)}(0) = \bar{c}_{\text{O}_2}^{(2)}(0) = c_{\text{O}_2}^{\text{BX}}(0) = \bar{c}_{\text{O}_2}^0,$$

$$\bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(1)}(0) = \bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^{(2)}(0) = c_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{BX}}(0) = \bar{c}_{\text{H}_2\text{O}}^0,$$

$$T_{\text{ГО}}^{(1)}(0) = T_{\text{ГО}}^{(2)}(0) = T_g^{\text{BX}}(0) = T_{\text{ГО}}^0.$$

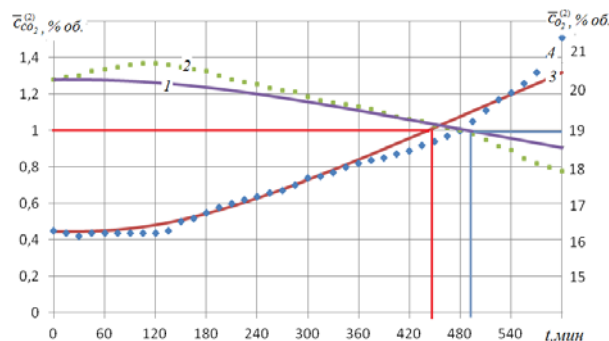
Система дифференциальных уравнений (1) – (11) с начальными и граничными условиями представляет собой замкнутую систему уравнений, для решения которой будем использовать неявный метод конечных разностей с четырехточечным шаблоном [4].

В результате получим неявную разностную схему, аппроксимирующую краевую задачу (1) – (11) с точностью  $O(h^2 + \tau)$ .

### Проверка адекватности модели и результаты вычислительного эксперимента.

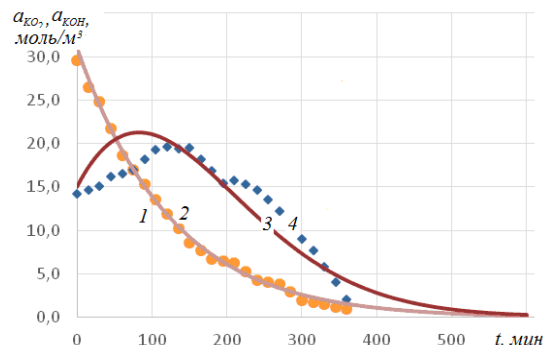
На рисунке 3 приведены графики изменения во времени экспериментальных значений и расчетных по модели концентраций кислорода  $\text{O}_2$  и диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в герметичном объекте.

Максимальное рассогласование между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 14%, что позволяет использовать ММ для расчета ВЗД регенеративного продукта и конструктивных параметров хемосорбционного реактора. Из анализа графиков следует, что ВЗД хемосорбента по диоксиду углерода составляет ~435 мин и по кислороду ~485 мин. Однако, эти выводы следуют из расчетов при фиксированном значении вектора неопределенных параметров  $\xi = \{k_1, k_2, c_{px}, \rho_x, \alpha\}$  и поэтому не могут быть приняты как окончательные рекомендации. Необходимо решить задачу определения минимального времени  $t_{\text{защ}}^{\min}$  защитного действия при возможном самом неблагоприятном сочетании компонентов вектора неопределенных параметров, изменяющихся в заданных пределах, определяемых областью  $\Xi$  и именно  $t_{\text{защ}}^{\min}$  будет характеризовать эффективность работы хемосорбционного реактора.



**Рис. 3. Динамика изменения концентраций кислорода (1, 2) и углекислого газа (3, 4) в герметичном объекте:**

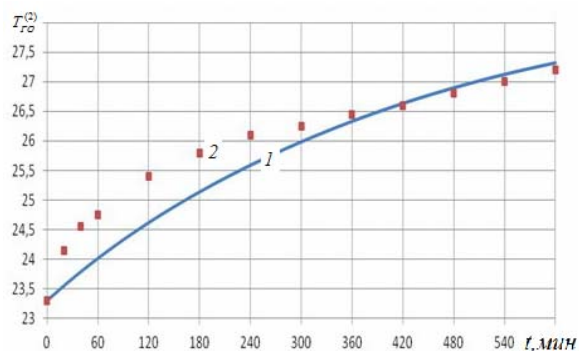
1, 3 – расчет; 2, 4 – эксперимент



**Рис. 4. Динамика изменения содержания  $\text{KO}_2$  (1, 2) и  $\text{KOH}$  (3, 4) в хемосорбенте:**

1, 3 – расчет;  
2, 4 – эксперимент

**Рис. 5. Динамика изменения температуры  
в зоне нахождения людей:**  
1 – расчет; 2 – эксперимент



Постановка задачи: требуется определить минимальное время защиты  $t_{\text{защ}}^{\min}$ , в течение которого концентрации кислорода (диоксида углерода) в герметичном объекте станут соответственно меньше (больше) предельно допустимых концентраций  $\hat{c}_{\text{O}_2}(t_{\text{защ}}^{\min}) \leq 19\% \text{ об.}$  ( $\bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t_{\text{защ}}^{\min}) \geq 1\% \text{ об.}$ ) независимо от изменения вектора неопределенных переменных в заданной области  $\Xi$ . Математическая постановка задачи имеет вид:

$$t_{\text{защ}}^{\min}(\xi^*) = \min_{\xi \in \Xi, t_{\text{защ}}} t_{\text{защ}}, \quad (12)$$

при связях (1) – (11) и ограничениях

$$\hat{c}_{\text{O}_2} - \bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t_{\text{защ}}, \xi) \leq 0; \quad \bar{c}_{\text{CO}_2}^{(2)}(t_{\text{защ}}, \xi) - \hat{c}_{\text{CO}_2} \leq 0. \quad (13)$$

**Закключение.** Разработаны алгоритмы решения задачи (12)–(13) в условиях неопределенности вектора параметров математической модели  $\xi = \{k_1, k_2, c_{px}, \rho_x, \alpha\} \in \Xi$  и расчета конструктивных переменных хемосорбента и реактора, при которых обеспечивается гарантированное значение ВЗД, при котором обеспечивает комфортные условия пребывания людей в герметичном объекте.

#### Список использованных источников

1. Дворецкий, С. И. и др. Новый подход к регенерации воздуха в герметичных обитаемых объектах / С. И. Дворецкий и др. // Вопросы современной науки и практики. Унститут имени В. И. Вернадского. – 2012. – Спец. вып. (39). – С. 159 – 165.
2. Гладышев, Н. Ф. и др. Разработка нанокристаллического материала для регенерации воздуха и изделий на основе этого материала / Н. Ф. Гладышев и др. // Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. – 2012. – Т. LVI, № 5–6. – С. 130 – 136.
3. Химический энциклопедический словарь. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – Т. 3. – С. 585.
4. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики : учеб. пособие для университетов / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М. : Наука, 1972. – 736 с.

#### References

1. Dvoretzky, S. I. et al. The new approach of designing sealed volumes for air regeneration. Questions of modern science and practice / S. I. Dvoretzky, et al. – Tambov, 2012 – Spec. v. (39). – P. 159 – 165.
2. Gladyshev N. F. et al. Designing of nanocrystalline material for the air regeneration and on based products / N. F. Gladyshev et al. // Mendeleev russian chem. soc. Journal. – Moscow, 2012. – V. LVI, N 5–6. – P. 130 – 136.
3. Chemical encyclopedic dictionary. – M. : Soviet encyclopedia, 1983. – V. 3 – 585 p.
4. Tihonov, A. N. Equations of math. physics / A.N. Tihonov, A.A. Samarsky. – M. : Science, 1972. – 736 p.

УДК 631.354  
ББК 40.728

**Ерохин Г. Н., Коновский В. В.**

Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники  
и нефтепродуктов в сельском хозяйстве  
(Россия, г. Тамбов)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА КОМБАЙНОМ ПРИ УБОРКЕ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР**

**Erokhin G. N., Konovsky W. W.**

Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture  
(Russia, Tambov)

## **MODELLING FUEL CONSUMPTION OF THE HARVESTER WHILE HARVESTING GRAIN CROPS**

*Аннотация.* Получена модель удельного расхода топлива зерноуборочным комбайном в зависимости от потребительских свойств конкретной марки комбайна и условий уборки в сельхозпредприятии. Установлены зависимости изменения удельного расхода топлива комбайном от урожайности и соломистости убираемых зерновых культур.

*Ключевые слова:* зерноуборочный комбайн, модель, расход топлива.

*Abstract.* The resulting model of the specific fuel consumption of combine harvester depending on the consumer properties of a particular brand of combine harvester and harvesting conditions in agricultural enterprises. Dependences of change of specific fuel consumption of the harvester from the yield and solomitol harvesting of crops.

*Keywords:* combine harvester, model, fuel consumption.

Оценивая перспективу применения зерноуборочного комбайна, потребитель обязательно учитывает его топливную экономичность [1 – 4]. Для этого используют показатель: удельный расход топлива (расход топлива в кг или л, приходящийся на 1 т убранных зерно). Как показывает мониторинг работы зерноуборочных комбайнов в реальной эксплуатации, этот показатель варьирует в широких пределах от 2,5 л/т до 7,0 л/т. Очевидно, что на топливную экономичность уборки влияет марка используемого комбайна и конкретные условия его применения в сельхозпредприятии. Точный ответ по расходу топлива комбайном на уборке зерновых культур в конкретном сельхозпредприятии можно получить лишь при испытаниях в условиях этого предприятия. Однако такой подход реализовать практически невозможно из-за его дороговизны. Поэтому целью настоящего исследования является разработка модели, позволяющей проводить такую оценку виртуально с помощью компьютерного моделирования.

К периодам эксплуатационного времени, связанным с работой двигателя зерноуборочного комбайна и расходом топлива, относятся [5 – 7]: затраты времени на основную

работу (обмолот зерна), затраты времени на повороты в конце загонки; затраты времени на переезд комбайна к месту выгрузки зерна и обратно; затраты времени на выгрузку зерна в транспортное средство; затраты времени на холостые переезды (к месту ночной стоянки и обратно, с поля на поле). Поэтому, удельный расход топлива при уборке зерновых культур комбайном определяется суммой:

$$g_K = g_{K1} + g_{K21} + g_{K22} + g_{K23} + g_{K6}, \quad (1)$$

где  $g_K$  – удельный расход топлива зерноуборочным комбайном, л/т;  $g_{K1}$ ,  $g_{K21}$ ,  $g_{K22}$ ,  $g_{K23}$ ,  $g_{K6}$  – удельный расход топлива соответственно при выполнении основной работы, поворотов в конце загонки, переезде комбайна к месту выгрузки зерна и обратно, на выгрузку зерна из бункера в транспортное средство, на холостые переезды, л/т.

Рассмотрим расход топлива в каждом из этих временных периодах.

При выполнении основной работы мощность двигателя комбайна расходуется на передвижение комбайна по полю, обмолот зерновой массы, измельчение и разброс соломой. Удельный расход топлива комбайном на основной работе можно описать формулой:

$$g_{K1} = \frac{q_{\phi 1} N_d K_{M1}}{10^3 \cdot W_1 u_T}, \text{ л/т}, \quad (2)$$

где  $q_{\phi 1}$  – фактический удельный расход топлива двигателем при коэффициенте использования мощности  $K_{M1}$ , г/л.с.·ч;  $K_{M1}$  – коэффициент использования мощности при выполнении комбайном основной работы;  $N_d$  – паспортная мощность двигателя, л.с.;  $W_1$  – производительность комбайна по основному времени [8], рассчитанная по паспортной пропускной способности комбайна, т/ч;  $u_T$  – удельный вес топлива (солярки), кг/л.

Удельный расход топлива комбайном при выполнении поворотов в конце загонки определяется по формуле:

$$g_{K21} = \frac{\tau_{21} q_{\phi 21} N_d K_{M21}}{10^3 \cdot W_1 u_n}, \text{ л/т}, \quad (3)$$

где  $\tau_{21}$  – удельные затраты времени на выполнение поворотов в конце загонки;  $q_{\phi 21}$  – фактический удельный расход топлива двигателем при коэффициенте использования мощности  $K_{M21}$ , г/л.с.·ч;  $K_{M21}$  – коэффициент использования мощности при выполнении комбайном поворотов в конце загонки.

Удельный расход топлива комбайном при переезде комбайна к месту выгрузки зерна и обратно равен:

$$g_{K22} = \frac{\tau_{22} q_{\phi 22} N_d K_{M22}}{10^3 \cdot W_1 u_T}, \text{ л/т}, \quad (4)$$

где  $\tau_{22}$  – удельные затраты времени на переезды комбайна к месту выгрузки зерна и обратно;  $q_{\phi 22}$  – фактический удельный расход топлива двигателем при коэффициенте

использования мощности  $K_{м22}$ , г/л.с.·ч;  $K_{м22}$  – коэффициент использования мощности при переезде комбайна к месту выгрузки зерна и обратно.

Удельный расход топлива комбайном на выгрузку зерна из бункера в транспортное средство:

$$g_{K23} = \frac{\tau_{23} q_{ф23} N_d K_{м23}}{10^3 \cdot W_1 u_{тT}}, \text{ л/т}, \quad (5)$$

где  $\tau_{23}$  – удельные затраты времени на выгрузку зерна из бункера в транспортное средство;  $q_{ф23}$  – фактический удельный расход топлива двигателем при коэффициенте использования мощности  $K_{м23}$ , г/л.с.·ч;  $K_{м23}$  – коэффициент использования мощности при выгрузке зерна из бункера в транспортное средство.

Удельный расход топлива комбайном при холостых переездах равен:

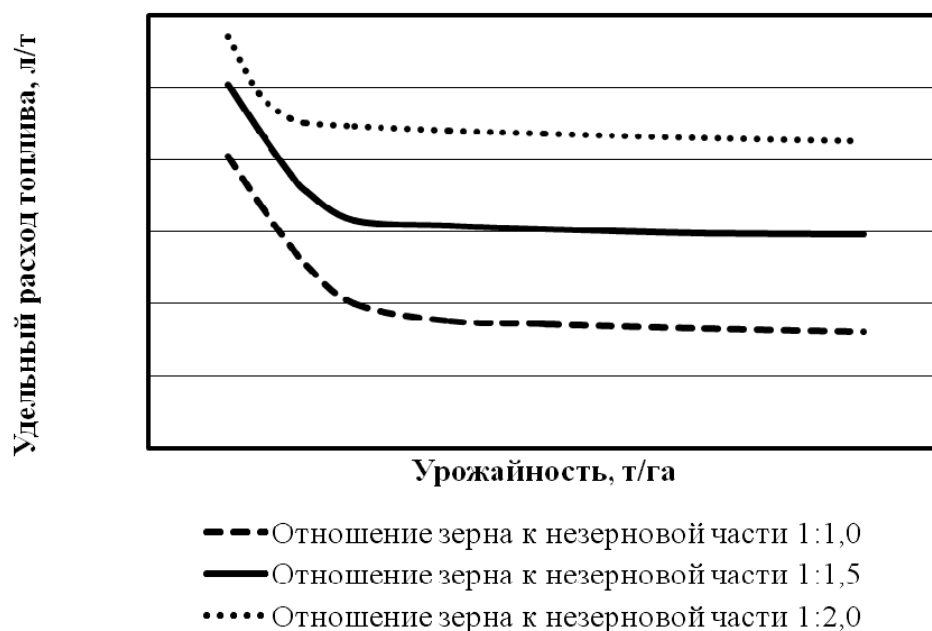
$$g_{K6} = \frac{\tau_6 q_{ф6} N_d K_{м6}}{10^3 \cdot W_1 u_{т}}, \text{ л/т}, \quad (6)$$

где  $\tau_6$  – удельные затраты времени на холостые переезды;  $q_{ф6}$  – фактический удельный расход топлива двигателем при коэффициенте использования мощности  $K_{м6}$ , г/л.с.·ч;  $K_{м6}$  – коэффициент использования мощности при холостых переездах.

Полученная математическая модель (1) – (6) позволяет установить влияние отдельных факторов, характеризующих условия уборки, на удельный расход топлива зерноуборочным комбайном. В данной работе такое исследование проводилось для установления зависимостей изменения удельного расхода топлива от урожайности и соломистости убираемых зерновых культур. В качестве исходных данных были приняты показатели комбайна Acros 530 и условий конкретного сельхозпредприятия (колхоз племенной завод им. Ленина, Тамбовская область).

В результате получены графические зависимости, представленные на рисунке. Характер зависимостей показывает, что удельный расход топлива снижается с повышением урожайности. При этом наблюдается участок резкого снижения и участок незначительного снижения. Участок резкого снижения расхода топлива связан с тем, что комбайн при низкой урожайности вынужден работать с неполной загрузкой молотилки и двигателя. При достижении урожайности, обеспечивающей работу комбайна с паспортной пропускной способностью, снижение расхода топлива становится минимальным. Так, при отношении зерна к незерновой части 1:1,5 резкое снижение удельного расхода наблюдается при повышении урожайности до 2,3 т/га.

Соломистость убираемой массы является значимым фактором, влияющим на расход топлива зерноуборочным комбайном. Как видно из рис. 1, при урожайности 4,5 т/га и отношении зерна к незерновой части 1:1,0 – удельный расход 2,83 л/т. При той же урожайности и отношении зерна к незерновой части 1:2,0 удельный расход топлива увеличивается на 47% до 4,15 л/т. Кроме того, соломистость влияет на точку перехода резкого снижения расхода топлива в незначительное. При отношении зерна к незерновой части 1:1,0 это происходит при урожайности 2,9 т/га, а при отношении зерна к незерновой части 1:2,0 – при урожайности 1,9 т/га.



**Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива комбайном Acros 530 от урожайности и соломистости убираемой массы**

**Выводы.** Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать расход топлива комбайнами при уборке зерновых культур, а также выявлять основные факторы, значимо влияющие на устойчивое развитие производства зерна в сельскохозяйственном предприятии.

#### *Список использованных источников*

1. Драгайцев, В. И. Эффективная работа зерноуборочных комбайнов в условиях МТС и сельскохозяйственных предприятий / В. И. Драгайцев, Г. Н. Ерохин, В. Н. Кузьмин, И. Г. Голубев // Техника и оборудование для села. – 2001. – № 5. – С. 26 – 29.
2. Ерохин, Г. Н. Моделирование показателей уборки зерновых культур / Г. Н. Ерохин, А. С. Решетов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 5. – С. 22 – 24.
3. Ерохин, Г. Н. Показатели ремонтпригодности зерноуборочных комбайнов / Г. Н. Ерохин, В. В. Коновский // Техника и оборудование для села. – 2007 – № 2. – С. 37–38.
4. Ерохин, Г. Н. Целесообразность услуг машинно-технологических станций на уборке зерновых культур // Техника и оборудование для села. – 2006. – № 5. – С. 30–31.
5. Ерохин, Г. Н. Результаты оценки пропускной способности зерноуборочных комбайнов в условиях реальной эксплуатации / Г. Н. Ерохин, В. В. Коновский // Наука в центральной России. – 2013. – № 6. – С. 45 – 48.
6. Ерохин, Г. Н. Сравнительная оценка зерноуборочных комбайнов Дон-1500Б и Вектор / Г. Н. Ерохин, Д. С. Орешкин // Тракторы и сельхозмашины. – 2008. – № 3. – С. 15–16.

7. Ерохин, Г. Н. Оценка уровня использования производительности зерноуборочных комбайнов / Г. Н.Ерохин, А. С. Решетов, В. В. Коновский // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 7. – С. 30 – 32.

8. Ерохин, Г. Н. Моделирование потерь зерна за зерноуборочными комбайнами / Г. Н. Ерохин, С. Н. Сазонов, В. В. Коновский // Вестник Мичуринского аграрного университета. – Мичуринск, 2014. – № 2. – С. 65 – 68.

#### *References*

1. Dragajcev, V. I. Efficient operation of combine harvesters under MTS and agricultural enterprises / V. I. Dragajcev, G. N. Erohin, V. N. Kuz'min, I. G. Golubev // Machinery and equipment for the village. – 2001. – N 5. – P. 26 – 29.

2. Erohin, G. N. Simulation parameters harvesting crops / G. N. Erohin, A. S. Reshetov // Mechanization and electrification of agriculture. – 2010. – N 5. – P. 22 – 24.

3. Erohin, G. N. Indicators maintainability combine harvesters / G. N. Erohin, V. V. Konovskij // Machinery and equipment for the village. – 2007 – N 2 – P. 37–38.

4. Erohin, G. N. Celesoobraznost' uslug mashinno-tekhnologicheskikh stancij na uborke zernovyh kul'tur // Tekhnika i oborudovanie dlya sela. – 2006. –N 5. – P. 30–31.

5. Erohin, G. . The evaluation capacity of combine harvesters in the conditions of actual use / G. N. Erohin, V. V. Konovskij //Science in central Russia. – 2013. – N 6. – P. 45-48.

6. Erohin, G. N. Comparative evaluation of grain combines Don-1500B and Vector / G. N. Erohin, D. S. Oreshkin // Tractors and farm machinery. – 2008. – N 3. – P. 15–16.

7. Erohin, G. N. Evaluation of the use of performance combine harvesters / G. N. Erohin, A. S. Reshetov, V. V. Konovskij // Tractors and farm machinery. – 2014. – N 7. – P. 30 – 32.

8. Erohin, G. N. Modelling of losses of grain for combine harvesters / G. N. Erohin, S. N. Sazonov, V. V. Konovskij // Bulletin Michurinsk Agrarian University. – Michurinsk : 2014. – N 2. – P. 65 – 68.

Шмырин А. М., Мишачев Н. М., Косарева А. С.  
Липецкий государственный технический университет  
(Россия, Липецк)

## ОКРЕСТНОСТНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭКОЛОГИИ\*

Shmyrin A. M., Mishachev N. M., Kosareva A. C.  
Lipetsk State Technical University  
(Russia, Lipetsk)

## NEIGHBORHOOD SYSTEMS IN ECOLOGY

*Аннотация.* В докладе обсуждается задача идентификации коэффициентов билинейных окрестностных систем, моделирующих равновесные состояния биологических сообществ.

*Ключевые слова:* окрестностные структуры; билинейные окрестностные модели.

*Abstract.* The report discusses the identification problem for coefficients of bilinear neighborhood systems, simulating equilibrium states of biological communities.

*Keywords:* neighborhood structures; bilinear neighborhood system.

*Окрестностной структурой* (см. [1, 2]) называется ориентированный граф с  $n$  вершинами (узлами) и ребрами двух типов. Эти ребра моделируют два типа *связей* между узлами: связи по состоянию ( $s$ -ребра) и связи по управлению ( $u$ -ребра). Два узла  $a_i$  и  $a_j$  могут быть соединены не более чем двумя  $s$ -ребрами (от  $a_i$  к  $a_j$  и от  $a_j$  к  $a_i$ ) и, соответственно, не более чем двумя  $u$ -ребрами. *Окрестностью узла  $a_i$  по состоянию* (управлению) называется множество всех концевых узлов  $s$ -ребер ( $u$ -ребер), исходящих из узла  $a_i$ . Окрестностная структура описывается матрицей смежностей  $[S; U]$ , составленной из двух матриц порядка  $n \times n$

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & \dots & s_{1n} \\ \dots & & \dots \\ s_{n1} & \dots & s_{nn} \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1n} \\ \dots & & \dots \\ u_{n1} & \dots & u_{nn} \end{bmatrix}.$$

Строка  $S_i = [s_{i1}, \dots, s_{in}]$  матрицы  $S$  задает связи узла  $a_i$  по состоянию:  $s_{ij} \in [0; 1]$ , если узел  $a_j$  входит в окрестность узла  $a_i$  по состоянию, иначе  $s_{ij} = 0$ . Аналогично определяются связи по управлению.

*Окрестностная система*, ассоциированная с окрестностной структурой, представляет собой систему  $n$  уравнений (какого либо типа), по одному уравнению для каждого

---

\* Работа поддержана грантом РФФИ (код проекта 16-07-00854 а).

узла. Каждое из уравнений описывает взаимодействие соответствующего узла с остальными узлами из его окрестности. В случае моделирования равновесного состояния биологического сообщества наиболее естественная математическая модель состоит из алгебраических билинейных уравнений, каждое из которых содержит одно линейное слагаемое, описывающее закон размножения или гибели  $i$ -й популяции сообщества, и несколько билинейных слагаемых, описывающих взаимодействие этой популяции с остальными, соответствующими связям  $i$ -й вершины графа. Данная схема может быть дополнена узлами, описывающими природные или какие-либо другие факторы, влияющие на сообщество. Задача идентификации состоит в определении коэффициентов этих уравнений. Если сообщество устойчиво относительно малых возмущений, то, предполагая статическую модель неизменной, можно попытаться набрать достаточную для идентификации коэффициентов статистику данных, внося управляемые возмущения в сообщество и наблюдая результаты.

Замечание. Если эти коэффициенты найдены, то от статической модели можно перейти к динамической модели, типа системы Лотки–Вольтерра. Известно, что поведение билинейных динамических систем «в целом» при  $n > 2$  может быть очень сложным (аттрактор Лоренца).

#### *Список использованных источников*

1. Блюмин, С. Л. Окрестностные системы / С. Л. Блюмин, А. М. Шмырин. – Липецк : Липецкий эколого-гуманитарный институт, 2005. – 132 с.
2. Шмырин, А. М. Кластеризация окрестностной структуры / А. М. Шмырин, Н. М. Мишачев, А. С. Косарева // Вестник Тамбовского государственного технического университета. Сер. Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, Вып. 2. – С. 457 – 462.

#### *References*

1. Blyumin, S. L. Neighborhood system / S. L. Blyumin, A. M. Shmyrin. – Lipetsk : LEGI, 2005. – 132 p.
2. Shmyrin, A. M. Clustering of Neighborhood structure / A. M. Shmyrin, N. M. Mishachev, A. C. Kosareva // Vestnik Tambov University. Ser. Naturaland Technical Sciences. – 2016. – V. 21, N. 2. – P. 457 – 462.

УДК 621.396.23

ББК 31.27-05

Артемова С. В.<sup>1</sup>, Артемов А. А.<sup>2</sup>, Каменская М. А.<sup>1</sup>, Зайни А.<sup>1</sup>, Рязанов А. С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов),

<sup>2</sup>Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина  
(Россия, г. Тамбов)

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ СИНТЕЗА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Artemova S. V.<sup>1</sup>, Artemov A. A.<sup>2</sup>, Kamenskaya M. A.<sup>1</sup>, Zaini, A.<sup>2</sup>, Ryazanov A. S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tamov State Technical University  
(Russia, Tambov)

<sup>2</sup>Tambov State University named after G. R. Derzhavin  
(Russia, Tambov)

## **INTELLECTUALIZATION OF SYNTHESIS OF THE SOLUTION OF PROBLEMS OF MANAGEMENT OF POWER-INTENSIVE OBJECTS**

*Аннотация.* Статья посвящена технологии интеллектуализации синтеза решения задач оптимального управления процессами энергоемких объектов на основе интегрированного графа.

*Ключевые слова:* технология интеллектуализации, оптимальное управление, граф.

*Abstract.* Article is devoted to technology of intellectualization of synthesis of the solution of problems of optimum control of processes of power-intensive objects on the basis of the integrated graph.

*Keywords:* technology of intellectualization, optimum control, graph.

Анализу и синтезу систем автоматического управления, с применением, в качестве основного математического аппарата раздела комбинаторной топологии – линейных направленных графов посвящен ряд известных работ. Например, в работе академика Б. П. Петрова приведено использование графического представления системы линейных дифференциальных уравнений для решения задач анализа и синтеза. Им предложены две формы представления уравнений – схемная и графная – получившие дальнейшее развитие в виде структурных схем направленных графов. Первая форма представления (схемная) легла в основу направления анализа динамических систем, получившего название структурных методов представленная в работах А. С. Шаталова, Н. Т. Кузовкина, А. М. Сучилина и др. Вторая форма (графная) не получила такого широкого применения, хотя успешно использовалась в структурных исследованиях И. И. Гальперина и др. В работе Т. М. Райцына рассматривается возможность исполь-

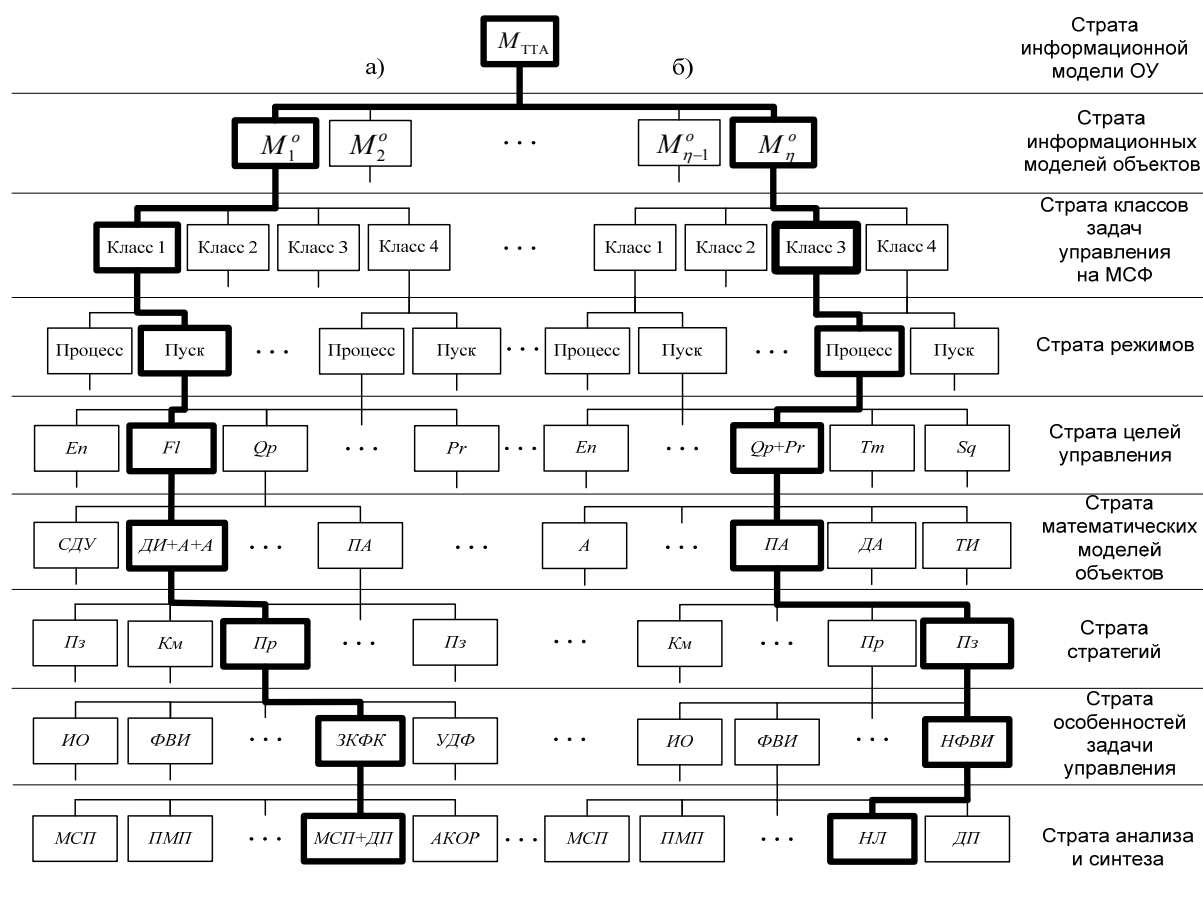
зования направленных графов для решения задач синтеза линейных систем автоматического управления [1]. Однако в перечисленных работах не приводятся решения задач управления тепло-технологическими процессами энергоемких объектов.

Для решения этой проблемы предлагается технология интеллектуализации синтеза решения задач оптимального управления (ЗОУ) процессами энергоемких объектов на основе интегрированного графа, вершины которого находятся на различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень характеризуется рядом особенностей, переменных законов и принципов, с помощью которых описывается поведение системы. Чтобы такое, иерархическое описание было эффективным, необходима как можно большая независимость моделей для различных уровней системы. Чтобы отличить эту концепцию иерархии от других, для нее используется термин стратифицированная система. Уровни абстракции, включающие стратифицированное описание называются стратами [2].

Целью решения задачи интеллектуализации синтеза является получение оптимального управления минимизирующего заданные функционалы. Технология интеллектуализации синтеза, реализованная в виде И–ИЛИ графа, отражает представление множества задач алгоритмизации синтеза управления тепло-технологическими аппаратами (ТТА) в пространстве состояний. Поиск, в пространстве состояний, характеризует решение конкретной задачи как процесс нахождения пути на графе состояний. В пространстве состояний вершины графа соответствуют состояниям решения задач и представляют собой фреймы знаний, оперирование которыми реализуется с использованием алгоритмов функциональных программных модулей, а ребрами – информация, передаваемая и получаемая в результате их работы. Вершины графа предлагается располагать на различных уровнях абстракции – стратах. Каждый уровень это этап решения задачи алгоритмизации синтеза. Введение страт позволяет выделить типовые этапы решения задач интеллектуализации синтеза управления, а также оптимизировать поисковые алгоритмы на графе, за счет рассмотрения только альтернативных путей в пространстве состояний.

Верхние страты предназначены для идентификации информационных моделей ТТА и моделей процессов его технологического оборудования. Страта классов ЗОУ характеризует особенности решения задач. Страты режимов и целей предназначены для определения функционала соответствующего заданной цели управления. В зависимости от режима работы объекта цель управления может меняться.

Страта моделей идентифицирует математическую модель объекта, пригодную для решения ЗОУ (рис. 1). Причем процедуры модулей идентификации позволяют по заданным экспериментальным данным подобрать наиболее адекватную модель объекта управления. Модели могут быть представлены в виде: ДУ – систем дифференциальных уравнений в частных производных с граничными условиями; ПА – процедурно-аналитических моделей (нейронные сети и т.д.); А – апериодического звена, ДИ – двойного интегратора; ДА – двойного апериодического звена, ТИ – тройного интегратора; а также систем дифференциальных уравнений с разрывной правой частью, например,  $ДА + ДА$ ,  $ДИ + А + А$  и т.д.



**Рис. 1. Интегрированный граф технологии интеллектуализации синтеза решения ЗОУ тепло-технологическими аппаратами**

Страта стратегий предлагает следующие стратегии реализации оптимального управления Кр – расширенную стратегию управления, Пр – программную, Пз – позиционную и Км – комбинированные стратегии управления и их разновидности.

Страта особенностей содержит процедуры, позволяющие решать задачи с учетом: интегральных ограничений (ИО), фиксированным и нефиксированным временным интервалом управления (ФВИ и НФВИ), закрепленными и незакрепленными концами траектории фазовых координат (ЗКФК и НКФК), фиксированными и интервальными параметрами моделей объектов (ФП и ИП), с учетом шумов (УШ) и т.д.

Страта анализа и синтеза ЗОУ содержит процедуры реализации методов: синтезирующих переменных (МСП), принципа максимума Понтрягина (ПМП), аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), динамического программирования (ДП), комбинированных (МСП+ДП) и т.д. Приведенная технология позволяет оперативно синтезировать решения ЗОУ без участия лица принимающего решение. Буквами а) и б) на графе показаны синтезированные решения различных задач оптимального управления.

Приведенная технология интеллектуализации синтеза решения ЗОУ позволяет оперативно синтезировать решения задач оптимального управления без участия лица принимающего решение [3].

#### *Список использованных источников*

1. Райцын, Т. М. Синтез систем автоматического управления методом направленных графов. – Л. : Энергия, 1970. – 96 с
2. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – М. : Мир, 1973. – 340 с.
3. Артемова, С. В. Информационная система оптимального управления тепло-технологическими аппаратами : монография. – М. ; СПб. ; Вена ; Гамбург : Изд-во МИНЦ, 2011. – 234 с.

#### *References*

1. Raytsyn, T. M. Synthesis of systems of automatic control of method of the directed graphs. – L. : Energy, 1970. – 96 p.
2. Mesarovich, M. Theory of hierarchical multilevel systems / M. Mesarovich, D. Mako, I. Takahara. – M. : World, 1973. – 340 p.
3. Artyomova, S. V. Information system of optimum control of warm and technological devices: the monograph. – M. ; SPb. ; Vienna ; Hamburg : MINTs publishing house, 2011. – 234 p.

УДК 66.067.38  
ББК Л113.9

**Абоносимов О. А., Лазарев С. И., Козлов А. А., Абоносимов Д. О., Стрельников А. Е.**  
Тамбовский Государственный Технический Университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОТОКА РАСТВОРА В ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИХ МОДУЛЯХ**

**Abonosimov O. A., Lazarev S. I., Kozlov A. A., Abonosimov D. O., Strelnikov A. E.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE HYDRODYNAMIC STRUCTURE OF THE FLOW OF THE SOLUTION IN REVERSE OSMOSIS MODULES**

*Аннотация.* Рассмотрен вопрос определения продольного перемешивания в обратно-осмотических модулях с помощью импульсного метода. По экспериментальным данным рассчитаны дисперсия времени пребывания и коэффициент продольного перемешивания. Определен вид однопараметрической диффузионной модели для обратноосмотического модуля с рулонными элементами ЭРО-Э-6,5/900А.

*Ключевые слова:* гидродинамическая структура, функция распределения, продольное перемешивание.

*Abstract.* The question of the definition of longitudinal mixing in reverse osmosis modules using pulse method. The experimental data were calculated the variance of the residence time and longitudinal mixing ratio. The form of the one-parameter diffusion model for reverse osmosis module with roller elements ЭРО-Э-6.5 / 900А.

*Keywords:* hydrodynamic structure, distribution function, longitudinal mixing.

Важной характеристикой гидродинамической структуры потока раствора в обратноосмотических модулях является коэффициент продольного перемешивания, который можно вычислить через статистические параметры дифференциальной функции распределения времени пребывания вещества в аппарате, получаемой экспериментально с помощью импульсного метода.

Функцию, описывающую изменение концентрации в потоке при импульсном вводе трассера, называют *С*-кривой, или внешней функцией распределения [1, 2].

Безразмерным начальным моментом *i*-го порядка, характеризующим *С*-кривую, является интеграл:

$$M_i = \int_0^{\infty} t^i C(t) dt, \quad (1)$$

где *t* и *C(t)* – безразмерные время и концентрация.

Безразмерный центральный момент  $i$ -го порядка:

$$\eta_i = \int_0^{\infty} (t - M_1)^i \eta_2(t) dt, \quad (2)$$

где  $M_1$  – среднее значение, или математическое ожидание, равное первому начальному моменту.

Для функции распределения времени пребывания, получаемой при импульсном вводе трассера в поток на входе в аппарат, первый начальный момент  $M_1$  представляет собой среднее время пребывания [2].

Из выражения (2) следует, что первый центральный момент всегда равен нулю, т.е.:

$$\eta = 0.$$

Второй центральный момент, называемый дисперсией, является мерой рассеяния времени пребывания и определяется по формуле

$$\eta_2 = \sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - M_1)^2 C(t) dt = M_2 - M_1^2. \quad (3)$$

Третий центральный момент  $\eta_3$  называется асимметрией, характеризует степень асимметричности кривой распределения ( $C(t)$  – кривой). Он определяется из уравнения

$$\eta_3 = \int_0^{\infty} (t - M_1)^3 C(t) dt. \quad (4)$$

Четвертый центральный момент, называемый эксцессом распределения, характеризует островершинность распределения и равен

$$\eta_4 = \int_0^{\infty} (t - M_1)^4 C(t) dt. \quad (5)$$

Обычно при расчете моментов по экспериментальным кривым используется ступенчатая аппроксимация, т.е. расчет моментов выполняется по формулам:

Начальные моменты:

$$M_0 = \sum_{i=1}^n \Delta \cdot c_i; \quad M_1 = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot t_i \cdot c_i; \quad M_2 = \sum_{i=1}^n \Delta t \cdot t_i^2 \cdot c_i, \quad (6)$$

где  $M_0$  – площадь, ограниченная кривой  $C(t)$  и осью  $t$ .

Масштабированные моменты:

$$M_0^M = \frac{M_0}{M_0} = M_1; \quad M_1^M = \frac{M_1}{M_0}; \quad M_2^M = \frac{M_2}{M_0}. \quad (7)$$

Безразмерные моменты:

$$M_i^T = \frac{M_i^M}{M_1^i}; \quad M_2^T = \frac{M_2^M}{M_1^2}. \quad (8)$$

Между безразмерными моментами и параметрами моделей существуют следующие соотношения:

$$M_{2\text{ОДМ}}^T = 1 + \frac{2}{Pe}; \quad M_{2\text{ЯМ}}^T = 1 + 1/n, \quad (9)$$

где  $Pe$  – критерий Пекле;  $n$  – число ячеек, ячеечной модели.

Таким образом, алгоритм идентификации математической модели структуры потока заключается в вычислении всех моментов и в определении с их помощью параметров выбранной модели.

Интерполяция данных производилась внутренними средствами Mathcad – функциями *interp*, для получения коэффициентов использовалась функция *lspline*. Контроль качества интерполирующей функции выполнялся графически. В случаях, когда кубическая интерполяция давала локальные экстремумы, менялся порядок интерполирующей функции, отсутствующий у экспериментальной функции.

Рассмотрим алгоритм решения на примере расчета для рулонного элемента ЭРО-Э-6,5/900А при давлении 4 МПа при скорости 0,08 м/с [3] (рис. 1).

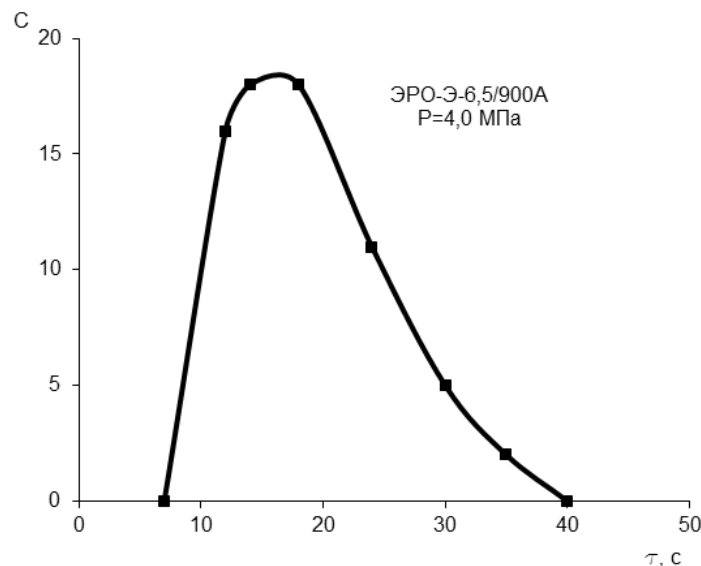
Исходная функция распределения определена в табл. 1.

Для промежуточных значений выполнена интерполяция, определяемая функцией  $F$  на отрезке  $t_1 \in [\tau_1; \tau_n]$ :

$$F(t_1) = \text{interp}(s, t, c, t_1). \quad (10)$$

Вектор значений  $s$  определен стандартной функцией *lspline*:

$$s = \text{lspline}(t, c). \quad (11)$$



**Рис. 1. Кривая отклика для рулонного элемента ЭРО-Э-6,5/900А при давлении 4,0 МПа и скорости раствора 0,08 м/с**

### 1. Исходная функция распределения

| $\tau, \text{с}$ | 7,0 | 12,0 | 14,0 | 18,0 | 24,0 | 30,0 | 35,0 | 40,0 |
|------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| $c$              | 0   | 16,0 | 18,1 | 17,9 | 11,0 | 5,0  | 2,0  | 0    |

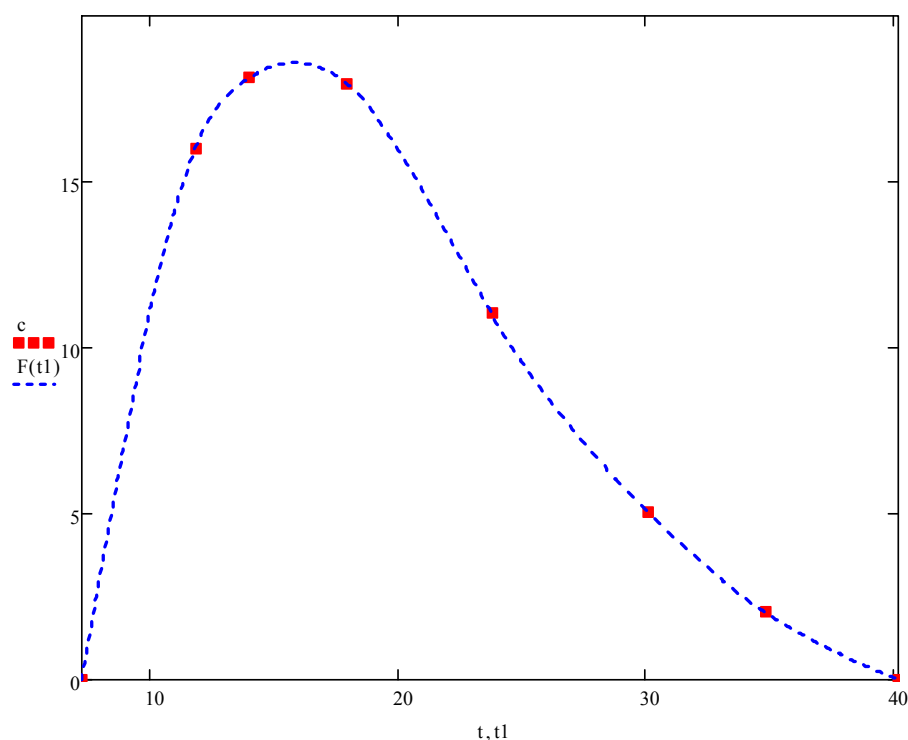


Рис. 2. Аппроксимирующая функция на отрезке  $[\tau_1; \tau_n]$

Для возможности численного решения аргументу  $t_1$  присвоены значения из промежутка  $[\tau_1; \tau_n]$  с шагом разбиения  $1/500$ , что достаточно для требуемой точности аппроксимации. Результат функции  $F(t_1)$  и ее сходимость представлены на рис. 2.

По численным значениям в MathCad определены начальные моменты:

$$M_0 = \sum_{i=0}^n (t_2 c_{1i}) = 9,348 \cdot 10^3, \quad (12)$$

$$M_1 = \sum_{i=0}^n [t_2(t_1)_i c_{1i}] = 1,776 \cdot 10^5, \quad (13)$$

$$M_2 = \sum_{i=0}^n [t_2[(t_1)_i]^2 (c_1)_i] = 3,774 \cdot 10^6. \quad (14)$$

Относительные моменты:

$$M_{1M} := \frac{M_1}{M_0} = 18,998, \quad (15)$$

$$M_{2M} := \frac{M_2}{M_0} = 403,711, \quad (16)$$

$$M_{2T} := \frac{M_{2M}}{(M_{1M})^2} = 1,119. \quad (17)$$

Значения критерия Пекле:

$$Pe := \frac{2}{(M_{2T} - 1)} 16,872. \quad (18)$$

Коэффициент продольного перемешивания:

$$D_X = U \frac{L}{Pe} \rightarrow 0,08 \cdot \frac{2}{16,872} = 9,483 \cdot 10^{-3}. \quad (19)$$

Таким образом, найденная однопараметрическая диффузионная модель для обратноосмотического модуля с рулонными элементами ЭРО-Э-6,5/900А будет иметь вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0,08 \frac{\partial c}{\partial x} - 9,483 \cdot 10^{-3} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}. \quad (20)$$

Начальные условия

$$t = 0; \quad c(t, x) = c(0, x) = 0. \quad (21)$$

Конечные условия

$$x = 0; \quad c(t, x) = c(0, x) = c_{bx}. \quad (22)$$

#### *Список использованных источников*

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химических технологии. – М. : Химия, 1973. – 783 с.
2. Холоднов, В. А. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов: Практическое руководство / В. А. Холоднов, В. П. Дьяконов, Е. Н. Иванова, Л. С. Кирьянова. – СПб. : АНО НПО «Профессионал», 2003. – 480 с.
3. Абоносимов, О. А. Влияние структуры потока раствора на массоперенос при баромембранном разделении промышленных растворов и стоков / О. А. Абоносимов, С. И. Лазарев, Д. О. Абоносимов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 16 – 19.

#### *References*

1. Kasatkin, A. G. Basic processes and apparatuses of chemical technology. – M. : Chemistry, 1973. – 783 с.
2. Kholodnov, V. A. Mathematical modeling and optimization of chemical processes: a Practical guide / V. A. Kholodnov, V. P. Dyakonov, E. N. Ivanova, L. S. Kiryanova. – SPb. : ANO NPO “Professional”, 2003. – 480 p.
3. Abonosimov, O. A. Influence of the flow pattern of the solution on mass transfer in baromembrane separation of industrial solutions and drains / O. A. Abonosimov, S. I. Lazarev, D. O. Abonosimov // Chemical and petroleum engineering. – 2016. – N 3. – P. 16 – 19.

**Голубятников О. О., Дубровин В. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ  
ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ  
КОМПЛЕКСНОЙ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ  
СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА**

**Golubyatnikov O. O., Dubrovin V. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**THE MATHEMATICAL MODEL OF INTELLECTUAL SUPPORT  
TO SHAPE INDIVIDUAL COMPLEX METHOD OF RAPID ASSESSMENT  
THE HUMAN HEALTH**

*Аннотация.* В статье рассмотрена математическая модель интеллектуальной поддержки для формирования индивидуальной комплексной методики, которая используется в системе поддержке принятия решений для проведения экспресс-оценки состояния здоровья человека.

*Ключевые слова:* система поддержки принятия решений, экспресс-оценка состояния здоровья человека.

*Annotation.* The article describes the mathematical model of intellectual support to shape individual complex method, is used in decision support system to rapid assessment of health human.

*Keywords:* the decision support system, the rapid assessment of health human.

**Введение.** Получение объективной многоаспектной информации о состоянии здоровья человека и определенных групп населения весьма трудоемкий и дорогостоящий процесс. В связи с этим в медико-биологической практике широко используются методики экспресс-оценки состояния здоровья, которые позволяют распознавать у человека различные патологические состояния с последующим уменьшением риска их возникновения, и являются менее затратными и более быстрыми, особенно при применении средств автоматизации. В существующих автоматизированных системах экспресс-оценки состояния здоровья слабо учитываются индивидуальные характеристики конкретного человека, что напрямую влияет на качество результатов экспресс-оценки состояния здоровья. Результаты могут быть как ложно-положительными, указывая на наличие в действительности отсутствующей болезни, так и ложно-отрицательными, не обнаруживая существующую патологию. Для устранения этих недостатков актуальной представляется задача разработки системы, которая основана на новом подходе к про-

ведению экспресс-оценки состояния здоровья, направленном на поддержку принятия решений для специалиста предметной области по формированию индивидуальной комплексной методики. При этом, предлагаемый новый подход может быть применен в системах проведения тестирования человека при оценке состояния здоровья, профессиональной пригодности, знаний, а также в системах обучения человека (повышение квалификации и т.п.) [1, 2].

**Математическая модель интеллектуальной поддержки принятия решений для формирования индивидуальной комплексной методики.** Предлагается новый подход к проведению экспресс-оценки состояния здоровья человека, направленный на поддержку принятия решений для специалиста предметной области по формированию индивидуальной комплексной методики. Пусть  $M = \{M_1, ..., M_i, ..., M_I\}$  – множество методик в банке данных, который формирует эксперт,  $M \supseteq (H, C)$ , где  $H = \{H_1^i, ..., H_\alpha^i, ..., H_A^i\}$  – подмножество характеристик различных групп населения,  $C = \{C_1^i, ..., C_k^i, ..., C_K^i\}$  – подмножество показателей здоровья. Каждый человек характеризуется набором индивидуальных характеристик  $Hs = \{Hs_1, ..., Hs_\varepsilon, ..., Hs_E\}$ ,

$|E| < |A|$ , и подмножеством их значений  $Xs$ . Для соотношения индивидуальных характеристик человека  $Hs$  с характеристиками различных групп населения  $H$  введены понятия «Основная характеристика»  $Hr$ , «Дополнительная характеристика»  $Hd$  и «Номинальная характеристика»  $Hn$ , которые определяются следующими подмножествами:  $Hr = \{Hr_1, ..., Hr_\beta, ..., Hr_B\}$ ,  $|B| < |A|$ ,  $Hr_\beta = \{Hn_1^\beta, ..., Hn_\gamma^\beta, ..., Hn_I^\beta\}$ ,  $Hn_\gamma^\beta = \{Hd_1^{\beta\gamma}, ..., Hd_\lambda^{\beta\gamma}, ..., Hd_\Lambda^{\beta\gamma}\}$ ,  $Hd_\lambda^{\beta\gamma} = \{Hn_1^{\beta\gamma\lambda}, ..., Hn_\xi^{\beta\gamma\lambda}, ..., Hn_\Xi^{\beta\gamma\lambda}\}$  и т.д.,  $Xr \supseteq (Xr_{нач}, Xr_{кон})$ ,  $Xd \supseteq (Xd_{нач}, Xd_{кон})$ ,  $Xn$  – множества их значений. Значения характеристик  $Hr_\beta$  и  $Hd_\lambda^{\beta\gamma}$  соотносятся с номинальными характеристиками  $Hn_\gamma^\beta$  и  $Hn_\xi^{\beta\gamma\lambda}$  по правилу (1):

$$\begin{cases} Xn_\gamma^\beta \in H_\alpha^i, \text{ если } Xs_\varepsilon \in [Xr_{нач}^{\beta\gamma}; Xr_{кон}^{\beta\gamma}] | \alpha \in A, \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \varepsilon \in E, \xi \in \Xi, \\ Xn_\xi^{\beta\gamma\lambda} \in H_\alpha^i, \text{ если } Xs_\varepsilon \in [Xd_{нач}^{\beta\gamma\lambda\xi}; Xd_{кон}^{\beta\gamma\lambda\xi}] | \alpha \in A, \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \lambda \in \Lambda, \varepsilon \in E, \xi \in \Xi, \end{cases} \quad (1)$$

Для количественной оценки методики  $M_i$  введен критерий (2):

$$QM_i(Xh, Xc, w) = \sum_{j=1}^J Xh_{ij} \left( \sum_{k=1}^K Xc_{ik} w_{jk} \right), \quad (2)$$

где  $J = \Gamma + \Xi$ ;  $Xh_{ij}$  определяется по правилу (3):

$$Xh_{ij} = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow \forall Xs_\varepsilon \notin \left( [Xr_{нач}^{\beta\gamma}; Xr_{кон}^{\beta\gamma}] \vee [Xd_{нач}^{\beta\gamma\lambda\xi}; Xd_{кон}^{\beta\gamma\lambda\xi}] \right) | \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \lambda \in \Lambda, \varepsilon \in E, \xi \in \Xi, \alpha \in A, \\ 1 \Leftrightarrow \left( \forall Xs_\varepsilon \in [Xr_{нач}^{\beta\gamma}; Xr_{кон}^{\beta\gamma}] \right) \wedge \left( \forall Hn_\gamma^\beta \in M_i \right) | \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \varepsilon \in E, i \in I, \alpha \in A, \\ \vee \left( \forall Xs_\varepsilon \in [Xd_{нач}^{\beta\gamma\lambda\xi}; Xd_{кон}^{\beta\gamma\lambda\xi}] \right) \wedge \left( \forall Hn_\xi^{\beta\gamma\lambda} \in M_i \right) | \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \lambda \in \Lambda, \varepsilon \in E, \xi \in \Xi, \alpha \in A, \end{cases} \quad (3)$$

$Xc_{ik}$  определяется по правилу (4):

$$Xc_{ik} = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow \forall C_k^i \notin M_i | i \in I, k \in K, \\ 1 \Leftrightarrow \forall C_k^i \notin M_i | i \in I, k \in K, \end{cases} \quad (4)$$

$w_{jk}$  – весовой коэффициент  $k$ -го показателя здоровья для  $j$ -й номинальной характеристики (5):

$$w_{jk} = \frac{\sum_{p=1}^P r_{pk}}{\sum_{k=1}^K \left( \sum_{p=1}^P r_{pk} \right)}, \quad (5)$$

где  $r_{pk} = \frac{b_{pk}}{\sum_{k=1}^K b_{pk}}$  – вес  $k$ -го показателя здоровья для  $p$ -го эксперта,  $b_{pk}$  – балл,

поставленный  $p$ -м экспертом для  $k$ -ого показателя здоровья,  $\sum_{k=1}^K b_{pk}$  – сумма баллов, поставленная  $p$ -м экспертом для  $K$  – показателей здоровья.

Выбор методик определяется индивидуальными характеристиками человека. Совокупность таких методик будем называть «Комплексная методика»:  $K_m = \{M_1, \dots, M_\zeta, \dots, M_Z\}$ ,  $|Z| \leq |I|$ ,  $K_m \in M$ . Для формирования  $K_m$  необходимо найти методики, оценивающиеся уравнением (2) и правилами (1), (3), (4), доставляющие максимальное значение критерию (6):

$$Q(Xh, Xc, w, c) = \max_{c_i} \sum_{i=1}^I c_i Q_{M_i}(Xh, Xc, w), \quad (6)$$

при одном из выбранных ограничений (7) – (9):

$$Q_{M_i} \geq Q_{\min}, \sum_{i=1}^I c_i = n, \quad (7)$$

где  $c_i = \{0, 1\}$  – переменная, определяющая выбрана или не выбрана  $i$ -я методика;  $n$  – заданное специалистом предметной области количество методик, которое необходимо подобрать,  $Q_{\min}$  – пороговое значение критерия оценки методики (2);

$$Q_{M_i} \geq Q_{\min}, t \leq T, \quad (8)$$

где  $T$  – заданное специалистом предметной области время прохождения экспресс-оценки состояния здоровья,  $t = \sum_{i=1}^I c_i \Delta t_i$ ;  $\Delta t_i$  – время, затраченное на прохождение  $i$ -методики.

$$Q_{M_i} \geq Q_{\min}, t \leq T \text{ и } \sum_{i=1}^I c_i \geq n. \quad (9)$$

Для оценки качества комплексной методики  $K_m$  введено понятие «Группа показателей»  $Cg = \{Cg_1, \dots, Cg_9, \dots, Cg_\Theta\}$ ,  $Cg_9 = \{Cg_1^9, \dots, Cg_p^9, \dots, Cg_P^9\}$ , и введены лингвистические переменные  $Dg^9$  и  $D$ , характеризующиеся наборами (10) и (11):

$$\langle Dg^{\mathfrak{g}}, Eg^{\mathfrak{g}}, Sg^{\mathfrak{g}} \rangle, \quad (10)$$

$$\langle D, E, S \rangle, \quad (11)$$

в которых  $Eg^{\mathfrak{g}} = [0; \sum_{i=1}^I QK_i^{\mathfrak{g}}]$ ,  $E = [0; \sum_{i=1}^I QK_i]$ ,  $QK_i^{\mathfrak{g}}$  и  $QK_i$  определяются по (12) и (15):

$$QK_i^{\mathfrak{g}} = \sum_{j=1}^J Xs_{ij} \left( \sum_{k=1}^K Xc_{ik}^{\mathfrak{g}} w_{jk} \right), \quad (12)$$

где  $Xs_{ij}$  и  $Xc_{ik}^{\mathfrak{g}}$  определяются по правилам (13) и (14):

$$Xs_{ij} = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow (\forall Hn_{\gamma}^{\beta} \vee \forall Hn_{\xi}^{\beta\gamma\lambda}) \notin M_i | i \in I, \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \lambda \in \Lambda, \xi \in \Xi, \\ 1 \Leftrightarrow (\forall Hn_{\gamma}^{\beta} \vee \forall Hn_{\xi}^{\beta\gamma\lambda}) \in M_i | i \in I, \beta \in B, \gamma \in \Gamma, \lambda \in \Lambda, \xi \in \Xi, \end{cases} \quad (13)$$

$$Xc_{ik}^{\mathfrak{g}} = \begin{cases} 0 \Leftrightarrow \forall C_k^{\mathfrak{g}} \notin M_i | i \in I, k \in K, \mathfrak{g} \in \Theta, \\ 1 \Leftrightarrow \forall C_k^{\mathfrak{g}} \in M_i | i \in I, k \in K, \mathfrak{g} \in \Theta, \end{cases} \quad (14)$$

$$QK_i = \sum_{j=1}^J Xs_{ij} \left( \sum_{k=1}^K Xc_{ik} w_{jk} \right), \quad (15)$$

Значения переменных  $Dg^{\mathfrak{g}}$  и  $D$  представлены нечеткими множествами (16), (17):

$$\tilde{S}g^{\mathfrak{g}} = \left\{ \left\langle \mu_{\tilde{S}g^{\mathfrak{g}}}(Qs^{\mathfrak{g}}) \mid Qs^{\mathfrak{g}} \right\rangle \right\}, \quad (16)$$

$$\tilde{S} = \left\{ \left\langle \mu_{\tilde{S}}(Qs) \mid Qs \right\rangle \right\}, \quad (17)$$

где  $\mu_{\tilde{S}g^{\mathfrak{g}}}(Qs^{\mathfrak{g}})$  и  $\mu_{\tilde{S}}(Qs)$  – функции принадлежности, отображающие значения переменных  $Qs^{\mathfrak{g}}$  и  $Qs$  в интервал  $[0;1]$ :

$$\mu_{\tilde{S}g^{\mathfrak{g}}}(Qs^{\mathfrak{g}}) = \frac{Qs^{\mathfrak{g}}}{\sum_{i=1}^I QK_i^{\mathfrak{g}}}, \quad (18)$$

$$\mu_{\tilde{S}}(Qs) = \frac{Qs}{\sum_{i=1}^I QK_i}, \quad (19)$$

где  $Qs^{\mathfrak{g}}$  и  $Qs$  рассчитываются по формулам (20) и (21):

$$Qs^{\mathfrak{g}} = \sum_{i=1}^I c_i \left( \sum_{j=1}^J Xh_{ij} \left( \sum_{k=1}^K Xc_{ik}^{\mathfrak{g}} w_{jk} \right) \right), \quad (20)$$

$$Q_s = \sum_{i=1}^I c_i \left( \sum_{j=1}^J Xh_{ij} \left( \sum_{k=1}^K Xc_{ik} w_{jk} \right) \right). \quad (21)$$

Оценки качества  $Sg^{\vartheta}$  и  $S$  комплексной методики Км определяются исходя из общих правил (22) и (23):

$$Sg^{\vartheta} = \left\{ Sq_b, \text{ если } \mu_{\tilde{S}g^{\vartheta}}(Qs^{\vartheta}) \in \left[ q_{\text{нач}}^b \sum_{i=1}^I QK_i^{\vartheta}; q_{\text{кон}}^b \sum_{i=1}^I QK_i^{\vartheta} \right] \middle| i = I, \vartheta = \Theta \right\}, \quad (22)$$

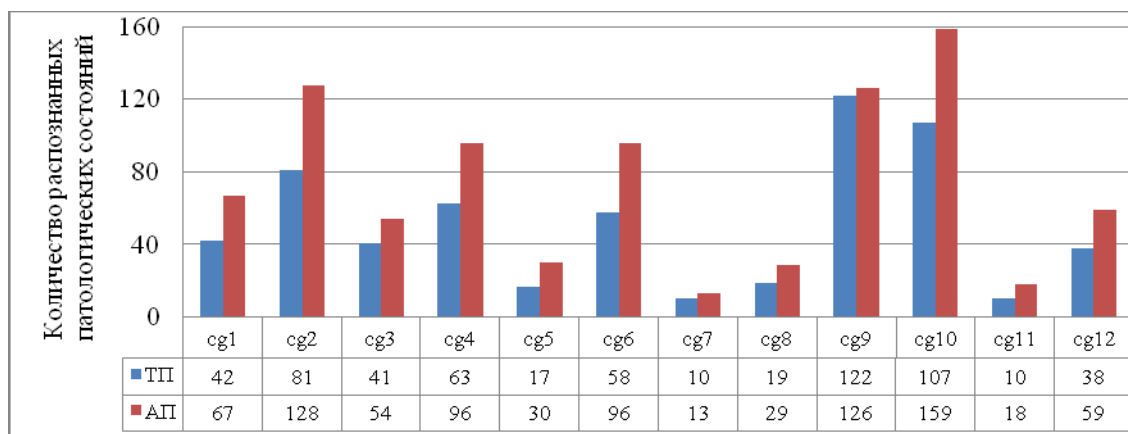
$$S = \left\{ Sq_b, \text{ если } \mu_{\tilde{S}}(Qs) \in \left[ q_{\text{нач}}^b \sum_{i=1}^I QK_i; q_{\text{кон}}^b \sum_{i=1}^I QK_i \right] \middle| i = I, \vartheta = \Theta \right\}, \quad (23)$$

где  $b = \overline{1, 4}$ ,  $Sq = \{Sq_1, Sq_2, Sq_3, Sq_4\}$ ,  $Sq_1$  = «неудовлетворительно»,  $Sq_2$  = «удовлетворительно»,  $Sq_3$  = «хорошо»,  $Sq_4$  = «отлично»;  $q_{\text{кон}}^l = q_{\text{нач}}^{l+1}$ ,  $q_{\text{нач}}^1 = 0$ ,  $q_{\text{кон}}^1 = \frac{1}{3}$ ,  $q_{\text{кон}}^2 = \frac{1}{2}$ ,  $q_{\text{кон}}^3 = \frac{2}{3}$ ,  $q_{\text{кон}}^4 = 1$ .

Выражения (1) – (23) составляют математическую модель интеллектуальной поддержки для формирования индивидуальной комплексной методики проведения экспресс-оценки состояния здоровья человека.

**Результаты и их обсуждение.** Для разработки системы были разработаны структурная схема, метод и алгоритм индивидуального подбора методик, фреймовая модель знаний о методиках, алгоритм вывода знаний о методиках и программное обеспечение. Апробация системы осуществлялась в отделениях профилактического осмотра ТОГБУЗ «ГКБ № 4 г. Тамбова», ТОГБУЗ «Городская поликлиника № 6 г. Тамбова» и в ТГУ им. Г. Р. Державина для трех категорий:

- 1) иностранные граждане (100 чел.);
- 2) российские студенты (200 чел.);
- 3) пациенты юношеского и среднего возрастов (150 человек). В результате исследования было распознано 653 патологических состояний (ПС) для традиционного подхода (ТП) и 908 для адаптивного подхода (АП), среди которых не менее 45 (6,9%) для ТП и не менее 33 (3,6%) для АП распознанных ПС оказались ложно-положительными (Л-П). Эффективность по качеству по Л-П результатам адаптивного подхода по сравнению с ТП составила 47,8%. На рисунке 3 приведен общий график распознанных патологических состояний по группам показателей здоровья  $Cg$  с вычетом Л-П патологических состояний для 450 человек ( $Cg_1$  = «Сердечно-сосудистая система»,  $Cg_2$  = «Психо-эмоциональная состояние»,  $Cg_3$  = «Нервная система»,  $Cg_4$  = «Репродуктивная система»,  $Cg_5$  = «Дыхательная система»,  $Cg_6$  = «Пищеварительная система»,  $Cg_7$  = «Зрительная система»,  $Cg_8$  = «Физические нагрузки»,  $Cg_9$  = «Вредные привычки»,  $Cg_{10}$  = «Качество жизни»,  $Cg_{11}$  = «Экологические показатели»,  $Cg_{12}$  = «Биологическая индивидуальность»).



**Рис. 1. Общий график распознанных патологических состояний по группам показателей здоровья с вычетом Л-П ПС для 450 человек**

Эффективность по качеству по ложно-отрицательным результатам адаптивного подхода по сравнению с ТП составила 30,5%.

Таким образом, использование системы позволяет повысить эффективность распознавания у человека различных патологических состояний по основным группам показателей здоровья на 30%, что доказывает эффективность предложенного адаптивного подхода по сравнению с традиционным подходом.

#### *Список используемых источников*

1. Голубятников, О. О. Подбор методик экспресс-оценки состояния здоровья человека на основе адаптивной системы / О. О. Голубятников, В. В. Дубровин // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2016. – № 15-1. – С. 100 – 109.
2. Голубятников, О. О. Экспертная система экспресс-оценки состояния здоровья / О. О. Голубятников, В. В. Дубровин, О. А. Остапенко // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2014. – № 48. – С. 102 – 106.

#### *References*

1. Golubyatnikov O. O. The selection of methods ex-press estimating a human health condition in the basis of the adaptive system / O. O. Golubyatnikov, V. V. Dubrovin // System analysis and management in biomedical systems. – 2016. – N 15-1. – P. 100 – 109.
2. Golubyatnikov, O. O. Expert system to rapid estimate the health human / O. O. Golubyatnikov, V. V. Dubrovin, O. A. Ostapenko // Vestnik of RSREU. – 2014. – N 48. – P. 102 – 106.

**Бадирова Н. Б., Тялина Л. Н.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ NI-CO-MO-V В NI-CO СОДЕРЖАЩЕМ КЕКЕ**

**Badirova N. B., Tyalina L. N.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **MODELING SYSTEMS NI-CO-MO-V IN NI-CO CONTAINING DROSS**

*Аннотация.* В статье приведены результаты термодинамического исследования Ni-Co содержащего кек. Для определения оптимальных параметров процесса были применены методы термодинамического моделирования. Исследования позволили определить, что процесс нужно проводить в температурном интервале 1900...2200 °С. В шлаковую фазу переходят  $V_2O_3$  (0...23,6%) и VO (100...76,4%). А металлизированная фаза содержит 76,84...76,93% Ni, 22,34...22,42% Co и 0,72...0,73% Mo.

*Ключевые слова:* Ni-Co содержащий кек, термодинамическое моделирование, шлаковая фаза, металлизированная фаза.

*Abstract.* In the article were published the results of the thermodynamic simulation of system contents Ni-Co-dross. To define optimal parameters of the process procedure the methods of the thermodynamic simulation have been applied. The research has carried on in the ranges of temperatures 1900...2200 °C. The slag phase  $V_2O_3$  (0...23,6%) and VO (100...76,4%) contains. The metal phase 76,84...76,93% Ni, 22,34...22,42% Co and 0,72...0,73% Mo contains.

*Keywords:* Ni-Co containing dross, thermodynamic modeling, slag phase, metal phase.

Ежегодно на нефтеперерабатывающих заводах образуется значительное количество отработанных катализаторов, содержащих редкие и цветные металлы. Извлечение этих металлов является актуальной технологической и экологической проблемой, поскольку выделенные металлы могут быть использованы для приготовления новых партий катализаторов, что позволит обеспечить снижение себестоимости и снизить количество отходов, загрязняющих окружающую среду.

В настоящее время известно достаточно большое количество способов переработки подобного вторичного сырья, основанных на ряде пиро- и гидрометаллургических процессах.

Для решения проблемы извлечения ценных компонентов из таких отходов нами предлагается использовать процесс хлоридовозгонки, обеспечивающий как коллективное, так и селективное извлечение металлов в хлоридные возгоны.

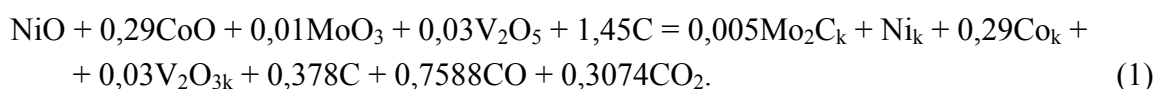
При селективной хлоридовозгонке металлов из отработанных катализаторов формируется Ni-Co содержащий кек, содержащий 67,7% NiO (53,2% Ni), 19,83% CoO (15,6% Co), 5,5% V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3,7% V) и 1,41% MoO<sub>3</sub> (0,94%Mo).

Одним из вариантов получения продукции на основе этого кека может стать совместное углестермическое восстановление металлов. Предварительно (по изменению  $\Delta G_T^0$ ) было установлено, что совместное восстановление оксидов возможно при температуре  $> 952,84$  K:

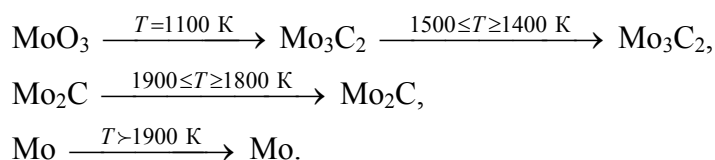
| T, K                 | 673     | 873    | 952,84 | 1073    | 1273    | 1473    | 1673    |
|----------------------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| $\Delta G_T^0$ , кДж | +480,12 | 134,97 | 0,00   | -196,73 | -508,76 | -816,19 | -119,71 |

Детальное теоретическое обоснование совместного восстановления оксидов Ni, Co, Mo и V проводилось при помощи программного комплекса «Астра» [1].

При  $T = 1000$  K происходит полное восстановление Ni и Co, формируется Mo<sub>2</sub>C, а V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не восстанавливается. Для  $T = 1000$  K химическое уравнение взаимодействия имеет вид:

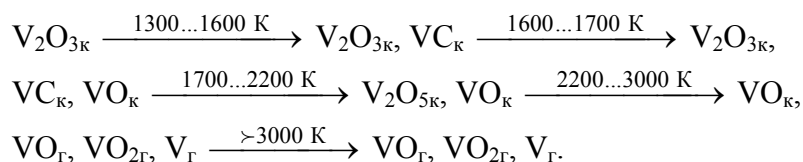


Элементный Mo в системе появляется при  $T \geq 1900$  K. При этом характер температурной последовательности восстановления MoO<sub>3</sub> имеет вид:



т.е. до  $T = 1900$  K карбидообразование Mo преобладает перед образованием элементного Mo.

Более сложная картина описывает температурную последовательность восстановления V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:



При  $T > 2100 \dots 2200$  K становится заметной возгонка восстановленных Ni и Co, достигающая 100% для Co при  $T = 2700$  K и Ni при  $T = 3000$  K.

Исходя из необходимости максимального получения металлических Mo, Ni и Co, а также соединений V в конденсированном состоянии, восстановление прокаленного кека необходимо проводить в температурном интервале 1900...2200 K. При большей температуре возрастают потери Ni и Co в газовую фазу (состав газовой фазы системы при  $P = 0,1$  МПа приведен в табл. 1).

**1. Влияние температуры на состав газовой фазы (об%)  
восстановления катализаторов углеродом при P = 0,1 МПа**

| Компоненты<br>газовой<br>фазы | Температура, К |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                               | 1000           | 1300  | 1600  | 1900  | 2200  | 2400  | 2600  | 2800  |
| CO                            | 71,17          | 99,48 | 99,81 | 99,64 | 98,80 | 97,11 | 90,11 | 67,60 |
| CO <sub>2</sub>               | 28,83          | 0,52  | 0,19  | 0,34  | 0,83  | 0,75  | 0,54  | 0,25  |
| Co                            | –              | –     | –     | 0,005 | 0,16  | 0,95  | 4,19  | 14,09 |
| Ni                            | –              | –     | –     | 0,006 | 0,18  | 1,08  | 4,81  | 17,06 |
| VO <sub>2</sub>               | –              | –     | –     | –     | 0,015 | 0,073 | 0,23  | 0,45  |
| VO                            | –              | –     | –     | –     | 0,001 | 0,013 | 0,08  | 0,17  |

Последовательность взаимодействия в системе прокаленный Ni–Co–Mo–V содержащий кек-углерод при P = 0,1 МПа описывается следующими уравнениями:

$$T = 1100K$$

$$0,005Mo_2C_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,03V_2O_{3k} + 0,378C + 0,7588CO + 0,3074CO_2 = 0,003Mo_3C_{2k} + Ni_k + 0,29Co_k + 0,03V_2O_{3k} + C + 1,18CO + 0,024CO_2; \quad (2)$$

$$T = 1500K$$

$$0,003Mo_3C_{2k} + Ni_k + 0,29Co_k + 0,03V_2O_{3k} + C + 1,18CO + 0,024CO_2 = 0,005Mo_2C_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,013V_2O_{3k} + 0,0017VC_k + 1,378CO + 0,076CO_2; \quad (3)$$

$$T = 1700K$$

$$0,005Mo_2C_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,013V_2O_{3k} + 0,0017VC_k + 1,378CO + 0,076CO_2 = 0,005Mo_2C_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,0066V_2O_{3k} + 0,017VO_k + 1,37CO + 0,0024CO_2; \quad (4)$$

$$T = 1900K$$

$$0,005Mo_2C_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,0066V_2O_{3k} + 0,017VO_k + 1,37CO + 0,0024CO_2 = 0,01Mo_k + Ni_k + 0,29Co_k + 0,001Co_r + 0,003V_2O_{3k} + 0,024VO_k + 1,389CO + 0,012CO_2. \quad (5)$$

В температурном интервале 1900...2200 К из катализатора формируются металлизированная и шлаковая фазы. Металлизированная содержит 76,84...76,93% Ni, 22,34...22,42% Co и 0,72...0,73% Mo. Температура сплава такого состава в соответствии с [2] составляет 1460К.

Шлаковая фаза содержит V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (от 0 до 23,6%) и VO (от 100 до 76,4%). Температуру плавления шлаковой фазы определили, используя систему уравнений Шредера–Ван-Лара [3]:

$$Ln x_1 = \frac{\Delta H_1}{RT_{1\text{пл}}} \left( 1 - \frac{T_{1\text{пл}}}{T} \right); \quad (6)$$

$$Ln x_2 = \frac{\Delta H_2}{RT_{2\text{пл}}} \left( 1 - \frac{T_{2\text{пл}}}{T} \right), \quad (7)$$

в которой  $x_i$  – мольные концентрации компонентов;  $\Delta H_{i\text{пл}}$  – теплоты плавления компонентов (Дж/моль);  $T_{i\text{пл}}$  – температуры плавления компонентов (К), определили линию ликвидуса системы Ni–Co. Найдено, что температура плавления получаемой металлизированной фазы (без учета содержания в ней Mo) составляет 1401 К. Имея в виду, что  $T_{\text{пл}}\text{VO} = 2103$  К [4],  $T_{\text{пл}}\text{V}_2\text{O}_3 = 2243$  К [4],  $\Delta H_{\text{пл}}\text{VO} = 62\,800$  кДж/моль [5] и  $\Delta H_{\text{пл}}\text{V}_2\text{O}_3 = 117\,200$  кДж/моль [6], определили, что линия ликвидуса системы VO–V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (приведенная к массовым процентам) представлена на рис.1.

На рисунке 2 приведена информация о температуре переработки кека ( $T_{\text{п}}$ ), составе полученного при этом шлака и температуре его плавления ( $T_{\text{пл}}$ ), (по линии ликвидуса) из которого следует, что  $T_{\text{п}} > T_{\text{пл}}$  при  $T \geq 2103$  К. Однако такой режим не может быть рекомендован для переработки катализаторов, т.к. при этом потери Co с газовой фазой, например при  $T = 2103$  К, составят 33,06%, Ni – 10,76% и газовая фаза содержит значительное количество Co и Ni (табл. 2). Из рисунка 2 следует, что температура процесса превышает температуру плавления в области концентрации VO от 87 до 100% и температурной области от 2056 до 2120 К (площадь ABC).

При уменьшении давления до 0,001 МПа в системе (в зависимости от температуры) присутствуют конденсированные Mo<sub>3</sub>C, Mo<sub>2</sub>C, Mo, Co, Ni, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, VC, VO, а также газообразные Mo, MoO, MoO<sub>2</sub> ( $T > 2400$  К), Co ( $T > 1700$  К), Ni ( $T > 1800$  К), VO<sub>2</sub> ( $T > 1900$  К), VO ( $T > 2000$  К), V ( $T > 2100$  К). При этом температура максимального ( $\approx 100\%$ ) образования Mo уменьшается до 1500 К.

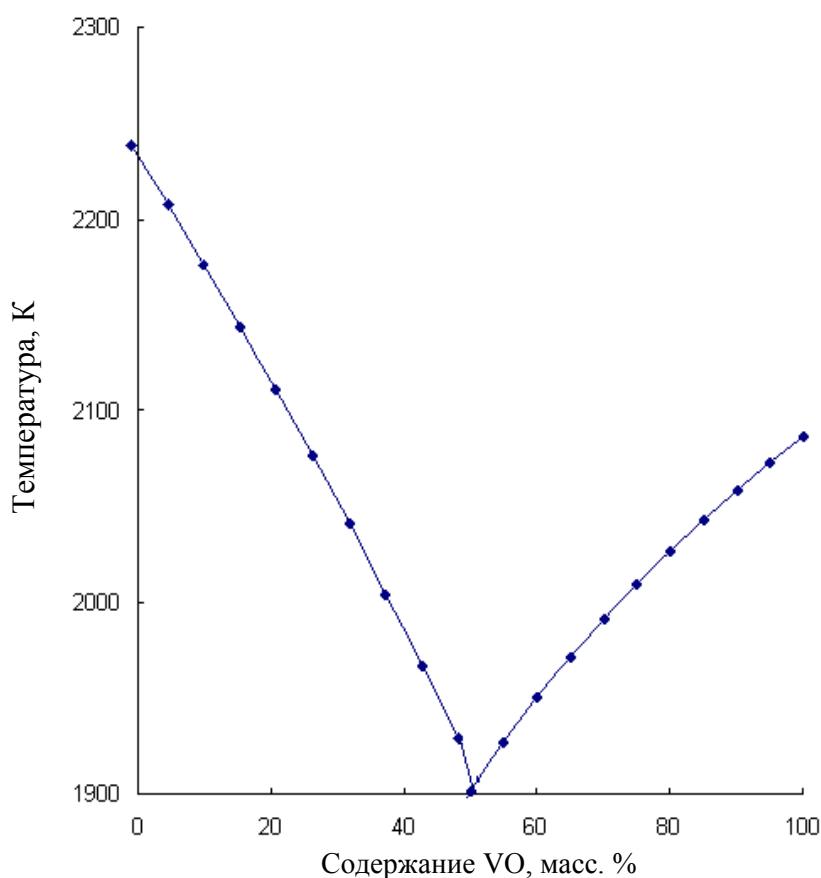
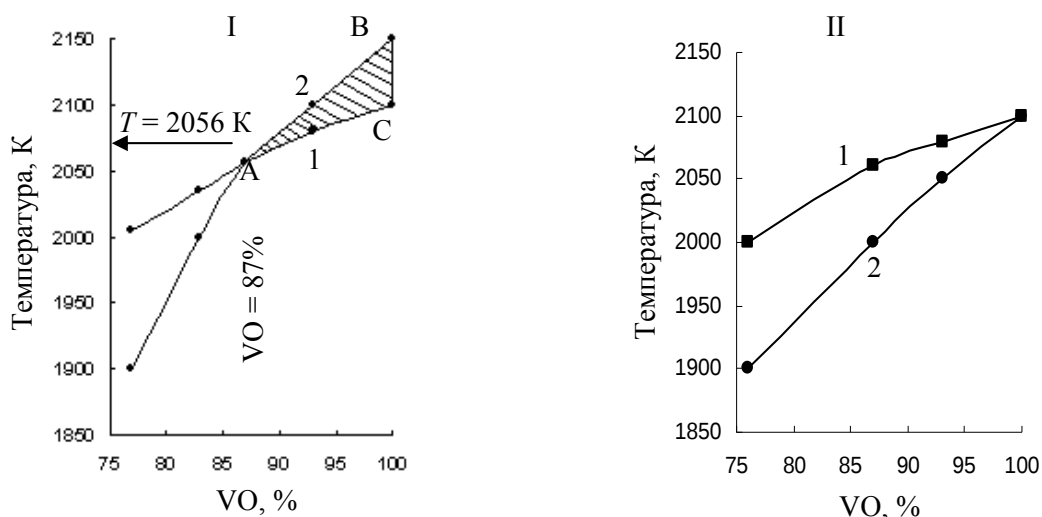


Рис. 1. Диаграмма плавкости системы VO–V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



I – P = 0,1 МПа, II – P = 0,001 МПа

1 – температура плавления шлака,

2 – температура получения шлака

**Рис. 2. Взаимосвязь между содержанием VO в шлаке, температурой его плавления и температурой его получения**

## 2. Влияние температуры на состав газовой фазы (об.%) восстановления катализаторов углеродом при P = 0,001 МПа

| Компоненты газовой фазы | Температура, К |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                         | 1000           | 1500  | 1700  | 1900  | 2100  | 2200  | 2300  | 2500  |
| CO                      | 99,43          | 99,92 | 99,76 | 98,45 | 86,58 | 66,84 | 51,38 | 50,79 |
| CO <sub>2</sub>         | 0,57           | 0,08  | 0,17  | 0,34  | 0,41  | 0,16  | 0,07  | 0,08  |
| Co                      | –              | –     | 0,004 | 0,566 | 5,97  | 13,91 | 10,68 | 10,56 |
| Ni                      | –              | –     | 0,005 | 0,62  | 6,66  | 18,46 | 36,60 | 36,18 |
| VO <sub>2</sub>         | –              | –     | –     | 0,002 | 0,04  | 0,15  | 0,15  | 0,54  |
| VO                      | –              | –     | –     | 0,02  | 0,32  | 0,43  | 0,43  | 0,87  |

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- восстановление Ni, Co и Mo углеродом из прокаленного кека необходимо проводить при P = 0,1 МПа и  $T \geq 2056$  К; в этом случае металлизированная (на основе Ni, Co и Mo) и ванадийсодержащая шлаковая фазы находятся в жидком состоянии и могут быть разделены ликвацией;
- уменьшение давления до 0,001 МПа не способствует улучшению технологических показателей процесса в связи с увеличением потерь Ni и Co в газовую фазу.

### Список использованных источников

1. Синярев, Б. Г. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Б. Г. Синярев, Н. А. Ватолин и др. – М. : Наука, 1982. – 263 с.

2. Удалов, Ю. П. Физико-химический компонент АРМ «Технолог электротермического производства» / Ю. П. Удалов, Ю. Г. Морозов // Доклады научно-техн. совещания «Электротермия – 2000». – СПб., 2000. – С. 57 – 62.
3. Хансен, М. Структуры двойных сплавов / М. Хансен, К. Андерко ; под ред. И. И. Новикова и И. Л. Рогельберга. – М. : Metallurgia, 1962. – Т. I. – 608 с.
4. Казачков, Е. А. Расчеты по теории металлургических процессов. – М. : Metallurgia, 1988. – 288 с.
5. Физико-химические свойства окислов : справочник / под ред. Г. В. Самсонова. – М. : Metallurgia, 1978. – 472 с.
6. Химическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – М. : Сов. Энциклопедия, 1988. – Т. 1. – 623 с.

### *References*

1. Sinyarev, B. G. The use of computers for the thermodynamic calculations of metallurgical process / B. G. Sinyarev, N. A. Vatolin et al. – M. : Nauka, 1982. – 263 p.
2. Udalov, Yu. P. The physico-chemical component of ARM “Technologist electrothermal production” / Yu. P. Udalov, Yu. G. Morozov // Reports of the Scientific and “Technical – 2000” Electroheat 'meeting. – St. Petersburg, 2000. – P. 57 – 62.
3. Hansen, M. The structures of binary alloys / M. Hansen, K. Anderko ; Ed. I. I. Novikov and I. L. Rogelberg. – M. : Metallurgy, 1962. – V. I. – 608 p.
4. Kazatchkov, E. A. Calculations based on the theory of metallurgical processes. – M. : Metallurgy, 1988. – 288 p.
5. Physico-chemical properties of oxides. Directory / Ed. G. V. Samsonov. – M. : Metallurgy, 1978. – 472 p.
6. Chemical encyclopedia in 5 volumes / Ch. Ed. I. L. Knuniants. – M. : Sov. Encyclopedia, 1988. – V. 1. – P. 623.

УДК 628.51:661.273.2  
ББК Л20

Данилина Ж. С., Третьяков А. А.  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИМИТАЦИОННОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУЛЬФИРОВАНИЯ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СУЛЬФАМИНОВОЙ КИСЛОТЫ**

**Danilina Zh. S., Tretyakov A. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**MATHEMATICAL MODELING AND SIMULATION STUDY OF THE PROCESS  
OF SULFONATION IN THE PRODUCTION OF SULFAMIC ACID**

*Аннотация.* Рассматриваются экологические аспекты производства сульфаминовой кислоты. Представлена математическая модель процесса сульфирования. Решаются задачи идентификации модели и имитационного исследования.

*Ключевые слова:* сульфаминовая кислота, математическая модель.

*Abstract.* The ecological aspects of the production of sulphamic acid. A mathematical model of the sulfonation process. Solves the problem of identification of the model and simulation research.

*Keywords:* sulfamic acid, mathematical model.

Проблема очистки оборудования от отходов и побочных продуктов производства является неотъемлемой частью любого производства. Это связано прежде всего с тем фактом, что любого рода осадок как правило снижает качество продукта на следующем цикле производства. Одним из эффективных средств для очистки от минеральных осадков является сульфаминовая кислота. Спрос на данный продукт стабильно высок, что связано с его широким применением на производстве и быту.

При нарушении хода технологического процесса происходит выбросы вредных газов (сернистый ангидрид, серный ангидрид). В больших количествах данные газы являются одними из основных, загрязняющих атмосферу. При соединении с водяным паром в воздухе образуется аэрозоль серной кислоты. Выпадая с осадками, она подкисляет почву, обостряет заболевания дыхательных путей, скрыто угнетающе воздействует на здоровье человека.

Поэтому задача ведения процесса строго по регламенту является особенно актуальной с точки зрения экологии и безопасности производства.

На предприятиях производящих подобную продукцию остро стоит вопрос снижения себестоимости при обеспечении качественных показателей, которая всегда существ-

венно зависит от технологии выполнения наиболее. Одним из наиболее сложных, длительных и трудоемких процессов при производстве сульфаминовой кислоты, является процесс сульфирования, протекающий в сульфураторе.

Сульфуратор представляет собой реактор с мешалкой и рубашкой.

Задачу нахождения оптимальных с точки зрения безопасности производства режимов ведения процесса невозможно решить без исследования с использованием методов математического моделирования.

При составлении математической модели процесса сульфирования принимаются следующие допущения [1]:

1. Реактор и рубашка с теплоносителем рассматриваются как объекты идеального смешения;
2. Теплофизические параметры веществ постоянны;
3. Тепловой емкостью рубашки пренебрегаем.

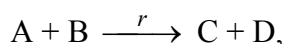
В процессе сульфирования протекает следующая химическая реакция [2]:



Далее будем рассматривать  $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (олеум) как один компонент.

Химический реактор представляет собой реактор периодического действия с мешалкой и рубашкой.

В реакторе протекает химическая реакция по схеме



где А – олеум; В – мочевины; С – сульфаминовая кислота; D – углекислый газ.

Общий материальный баланс объекта по реакционной массе в динамическом режиме отражается уравнением:

$$\frac{dM}{d\tau} = G_W - G_{\text{CO}_2}, \quad (1)$$

где  $M$  – масса реакционной смеси,  $\text{м}^3$ ;  $G_W$  – расход мочевины на входе в реактор,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $G_{\text{CO}_2}$  – расход углекислого газа на выходе,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Для переменной  $M$  стоящей в (1) под знаком производной, требуется задать начальное условие:

$$M(0) = M^0, \quad M^0 = M_f, \quad (2)$$

где  $M(0)$  – значение реакционной массы в емкости в момент времени  $\tau = 0$ ,  $\text{м}^3$ ;  $M_f$  – масса загруженного олеума, кг.

Будем считать, что расход мочевины через шнековый дозатор зависит от частоты вращения шнека и определяется эмпирической зависимостью вида:

$$G_W = f(n_{\text{шнека}}). \quad (3)$$

Уравнения покомпонентного материального баланса имеют вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d(MC_A)}{d\tau} = G_W C_A^{\text{BX}} - rM \frac{1}{\rho}, \quad (4)$$

$$\frac{d(MC_B)}{d\tau} = -rM, \quad (5)$$

$$\frac{d(MC_C)}{d\tau} = 2rM, \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d(MC_D)}{d\tau} = -G_{\text{CO}_2} C_D + rM \frac{1}{\rho}, \quad (7)$$

где  $C_A, C_B, C_D, C_C$  – концентрации веществ A, B, C, D соответственно, моль/м<sup>3</sup>;  $r$  – скорость химической реакции, моль/(м<sup>3</sup>·с);  $\rho$  – плотность реакционной массы, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость химической реакции определяется по формуле:

$$r = K \exp\left(-\frac{E}{R(273+t)}\right) C_A C_B. \quad (8)$$

где  $K$  – константа скорости реакции, м<sup>3</sup>/(моль·с);  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К.

Начальные условия для уравнений (4 – 7):

$$C_A(0)M(0) = C_A^0 M^0, \quad (9)$$

$$C_B(0)M(0) = C_B^0 M^0, \quad (10)$$

$$C_C(0)M(0) = C_C^0 M^0, \quad (11)$$

$$C_D(0)M(0) = C_D^0 M^0. \quad (12)$$

Уравнение энергетического (теплового) баланса для реакционной массы имеет вид:

$$c_p \frac{d(Mt)}{d\tau} = G_W \rho_W c_W t_W^{\text{BX}} - G_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2} t_{\text{CO}_2} + K_T S(t_T - t) + rM \Delta H \frac{1}{\rho}, \quad (13)$$

$$t(0)M(0) = t^0 M^0, \quad (14)$$

где  $t_T$  – температура теплоносителя, °С;  $\rho_W$  – плотность мочевины, кг/м<sup>3</sup>;  $c_W$  – концентрация мочевины, моль/м<sup>3</sup>;  $t_W^{\text{BX}}$  – температура мочевины на входе, °С;  $G_{\text{CO}_2}$  – расход углекислого газа, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_{\text{CO}_2}$  – плотность углекислого газа, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{CO}_2}$  – концентрация углекислого газа, моль/м<sup>3</sup>;  $t_{\text{CO}_2}$  – температура углекислого газа, °С;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи, Дж/(м<sup>2</sup>·с·°С);  $S$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>;  $r$  – скорость реакции,  $\Delta H$  – тепловой эффект реакции, Дж/моль.

Уравнение материального баланса для теплоносителя имеет вид:

$$\frac{dM_T}{d\tau} = G_T^{\text{BX}} - G_T^{\text{ВЫХ}} \quad (15)$$

где  $M_T$  – масса теплоносителя в рубашке, кг;  $G_T^{\text{BX}}$ ,  $G_T^{\text{ВЫХ}}$  – расходы теплоносителя на входе и на выходе из рубашки, м<sup>3</sup>/с.

Вследствие того, что объем рубашки  $V_{\text{зм}}$  постоянный уравнение (15) можно переписать в виде:

$$G_T^{\text{BX}} = G_T^{\text{ВЫХ}} = G_T.$$

Уравнение энергетического (теплового) баланса для теплоносителя имеет вид:

$$M_T c_T \frac{dt_T}{d\tau} = G_T \rho_T c_T (t_T^{\text{BX}} - t_T) - K_T S (t_T - t), \quad (16)$$

$$t_T(0) = t_T^0. \quad (17).$$

Таким образом, математическое описание динамики химического реактора представляет собой систему алгебраических и дифференциальных уравнений, с соответствующими начальными условиями.

В математическую модель процесса сульфирования входят неизвестные параметры  $K$ ,  $E$ ,  $\Delta H$  значения которых необходимо определить в результате решения задачи идентификации [3].

Задача идентификации заключается в отыскании  $\mathbf{a}^* = \{K, E, \Delta H\}$  такого, что:

$$\mathbf{a}^* = \arg \min_{\mathbf{a}} F(\mathbf{a}),$$

где функция идентификации имеет вид:

$$F(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N \int_0^{\tau_i} \left( \frac{(t)_i^{\text{p}} - (t)_i^{\text{э}}}{(t)_i^{\text{э}} - \underline{(t)_i^{\text{э}}}} \right)^2 d\tau.$$

Здесь  $(t)_i^{\text{э}}$ ,  $(t)_i^{\text{p}}$  – соответственно экспериментальное и рассчитанное по модели значение температуры реакционной смеси полученное в  $i$ -м эксперименте;  $N$  – количество экспериментов;  $\overline{(t)_i^{\text{э}}}, \underline{(t)_i^{\text{э}}}$  – диапазон изменения экспериментальных значений  $(t)_i^{\text{э}}$ ,  $(t)_i^{\text{э}}$  в  $i$ -ом эксперименте:

$$\overline{(t)_i^{\text{э}}} = \max_{\tau} (t)_i^{\text{э}}, \quad \underline{(t)_i^{\text{э}}} = \min_{\tau} (t)_i^{\text{э}}.$$

В результате решения задачи идентификации найдены следующие значения неизвестных параметров:  $K = 101$  м<sup>3</sup>/(моль с);  $E = 516$  Дж/моль;  $\Delta H = 70,1 \cdot 10^7$  Дж/моль. Найденные параметры позволили обеспечить приведенную погрешность порядка 4...6% относительно экспериментальных данных, использованных для решения задачи идентификации.

На рисунке 1 представлены экспериментальные значения и расчетная кривая температуры реакционной смеси в сульфураторе. Они позволяют судить о точности модели.

Для исследования процесса сульфирования были построены динамические характеристики процесса. Для этого входные воздействия изменялись на 20% от их исходных значений:  $G_T = 0,2$  кг/с;  $t_T^{BX} = 15$  °C;  $t_{oc} = 20$  °C;  $G_W = 0,1009$  кг/с;  $t_W^{BX} = 25$  °C. График динамических характеристик приведен на рис. 2.

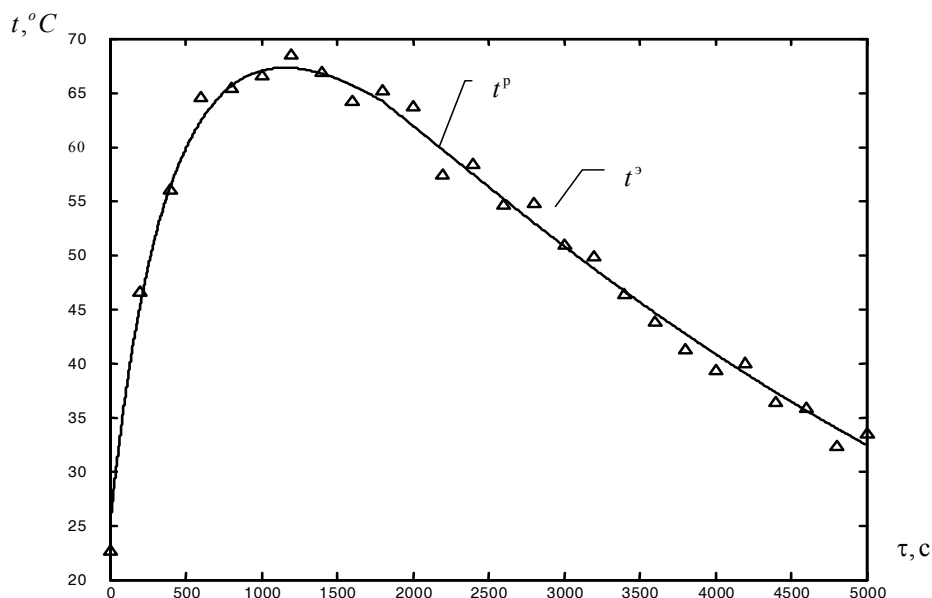


Рис. 1. Температура реакционной смеси в сульфураторе

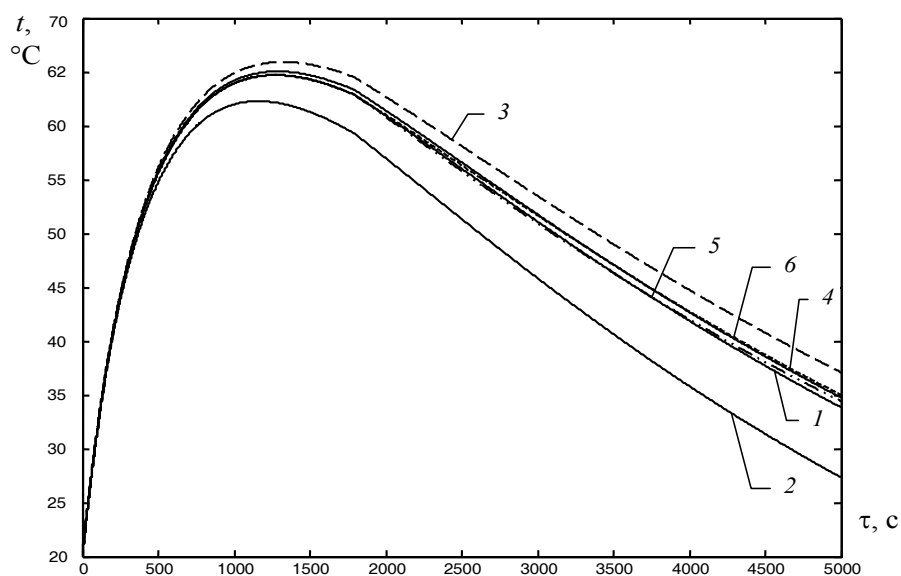


Рис. 2. Переходные функции объекта управления в период охлаждения:

1 – при фиксированных значениях входных параметров; 2 – при увеличении расхода воды  $G^T$  ( $\Delta G^T = 0,04$  кг/с); 3 – при увеличении температуры воды на входе  $t^{T BX}$  ( $\Delta t^{T BX} = 3$  °C); 4 – при увеличении температуры окружающей среды  $t_{oc}$  ( $\Delta t_{oc} = 4$  °C); 5 – при увеличении расхода мочевины  $G_W$  ( $\Delta G_W = 0,02$  кг/с); 6 – при увеличении температуры мочевины на входе  $t_W^{BX}$  ( $\Delta t_W^{BX} = 5$  кг/с)

Анализируя полученные данные, делаем вывод о наибольшем воздействии на температуру реакционной смеси расхода охлаждающей воды. Данный технологический параметр является регулирующим для процесса сульфирования. Основным возмущающим воздействием является изменение температуры охлаждающей воды на рубашку реактора. Остальные входные параметры оказывают незначительное влияние на температуру реакционной смеси.

#### *Список используемых источников*

1. Елизаров, И. А. Моделирование систем : учебное пособие / И. А. Елизаров, Ю. Ф. Мартемьянов, А. Г. Схиртладзе, А. А. Третьяков. – Старый Оскол : Изд-во ТНТ, 2013. – 136 с.
2. Орехов, В. С. Технология органических полупродуктов : учеб. пособие / В. С. Орехов, Т. П. Дьячкова, М. Ю. Субочева, М. А. Колмакова. – Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2007. – 140 с.
3. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза : Пенз. гос. ун-т, 2003. – 215 с.

#### *References*

1. Elizarov, I. A. Modeling systems : a tutorial / I. A. Elizarov, Y. F. Martemyanov, A. G. Skhirtladze, A. A. Tretyakov. – Sary Oskol : Publishing House of TNT, 2013. – 136 p.
2. Orekhov, V. S. Technology of Organic Intermediates : Textbook / V. S. Orekhov, T. P. Dyachkova, M. Yu. Subocheva, M. A. Kolmakova. – Tambov : Publisher TSTU, 2007. – 140 p.
3. Semenov, A. D. The identification of objects of management : Textbook / A. D. Semenov, D. V. Artamonov, A. V. Bryuhachev. – Penza : Penz. state. University Press, 2003. – 215 p.

УДК 004.94:66.095.834  
ББК 3973.73+Л10

**Майстренко А. В., Майстренко Н. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
И ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ХТП  
НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

**Maystrenko A. V, Maystrenko N. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**DEVELOPMENT OF INFORMATION SYSTEMS MODELING AND DESIGN  
OF RESOURCE-SAVING CTP BASED OBJECT-ORIENTED APPROACH**

*Аннотация.* Рассматривается возможность и этапы проектирования информационных систем для сложных химико-технологических процессов с использованием объектно-ориентированного подхода. В качестве примера выбран процесс диазотирования получения азопигментов и приводятся результаты моделирования этого процесса.

*Ключевые слова:* объектно-ориентированный подход, модель предметной области, модель базы данных, химико-технологическая схема, диазотирование, моделирование.

*Abstract.* Possibility and stages of designing of information systems for difficult chemical-technological process with object-oriented approach usage is considered. As an example process diazotization of synthesis of azopigments is selected and results of modeling of this process are resulted.

*Keywords:* object-oriented approach, model of data domain, model of database, scheme of chemical-technology, diazotization, modeling.

Автоматизированная разработка принципиальных технологических схем новых энерго- и ресурсосберегающих химических производств может быть реализована с применением современных компьютерных систем математического моделирования, оптимизации и проектирования, которые позволяют выполнять всесторонний анализ сложных процессов, ситуаций, проектов и решений, перебирать их и в конечном итоге выдавать наиболее рациональное решение. При этом ускоряется процесс принятия решений, сокращаются затраты на внедрение новых проектов, а необходимый результат достигается неразрушающими и природосберегающими методами.

Опыт разработки программ, которые подлежат модификации в условиях изменяющихся требований, – а именно к такому типу программ относятся программные комплексы моделирования ХТС, – выявил приоритетность объектно-ориентированных технологий для данного класса систем [1]. Подход, на котором основаны объектно-ориентированный анализ и проектирование, ведет к объединению системного анализа с процессом логического проектирования. Это позволяет применять системный анализ

и логическое проектирование в течение всего жизненного цикла разработки, а также преодолевать проблемы, возникающие в процессе трассировки математических моделей системы.

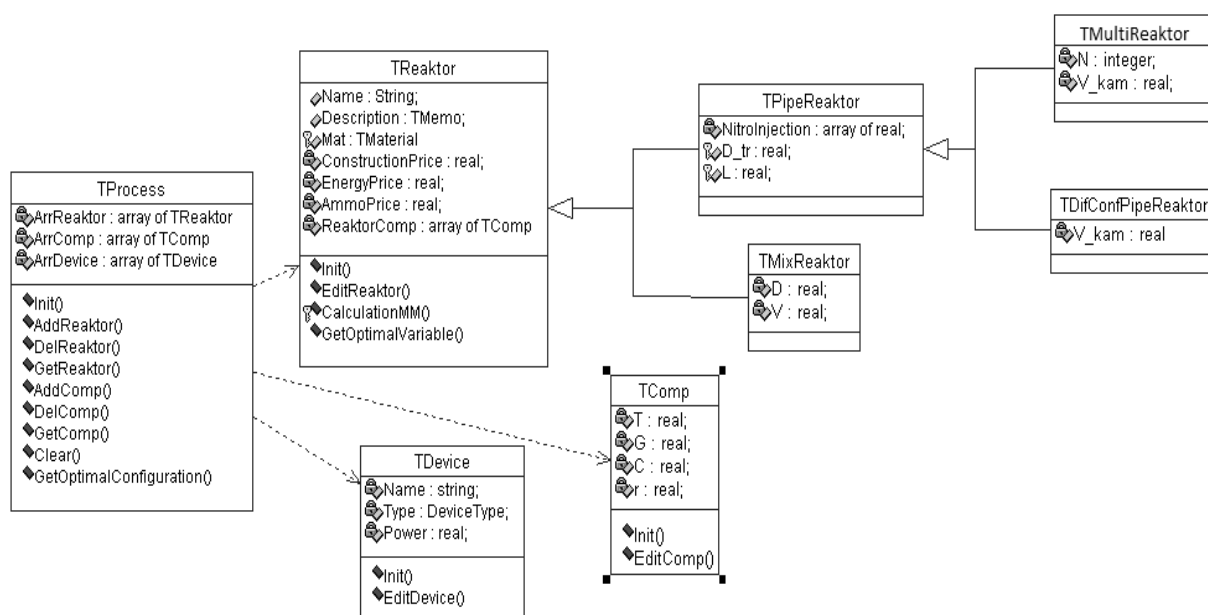
Рассмотрим в качестве примера построение с помощью объектно-ориентированного подхода математических моделей непрерывных технологических процессов диазотирования и азосочетания синтеза азопигментов [2], реализованное в информационной системе компьютерного моделирования и оптимального проектирования процессов и аппаратов ресурсосберегающих химико-технологических процессов.

Первым этапом построения математической модели является построение модели предметной области в виде диаграммы классов без указания атрибутов операций и кратности ассоциаций (связей), которая одновременно является и диаграммой статической модели химико-технологического процесса (рис. 1).

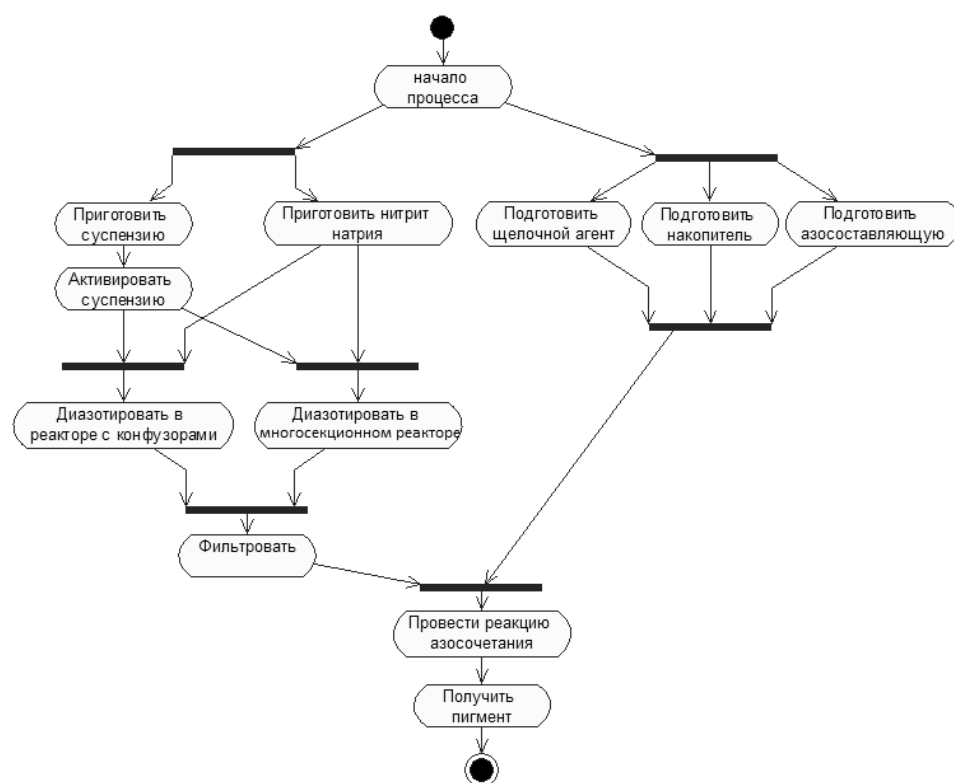
Параллельно с моделированием предметной области необходимо создать модель активности системы. Это связано с тем, что увеличение сложности системы приобретает все более важное значение и требует более четкой реализации последовательности выполняемых операций. Модель активности позволяет детализировать особенности алгоритмической и логической реализации выполняемых системой операций. В модели активности очень важно учесть все операции системы, так как они являются основой для создания структуры программы, поддерживаемой требуемое поведение.

Анализ модели активности позволяет уточнить модель предметной области, которая становится основой для проектирования модели химико-технологической системы. Алгоритм формирования математической модели опирается на блочно-модульный принцип построения математических моделей (рис. 2).

Заключительной стадией моделирования системы является создание модели базы данных, которая отражает взаимодействие таблиц, входящих в базу данных, а также содержит подробное описание атрибутов операций и связей между этими таблицами.



**Рис. 1. Диаграмма классов химико-технологических процессов при производстве азопигментов**



**Рис. 2. Диаграмма активности моделируемой системы**

Таким образом, в результате итеративного, с поэтапным наращиванием возможностей, процесса, разработана объектно-ориентированная проектная модель ХТС, подлежащая дальнейшей кодогенерации.

Предложенная схема проектирования математических моделей химико-технологических систем с применением прогрессивных объектно-ориентированных технологий использована при разработке компьютерной среды для моделирования и проектирования процессов тонкого органического синтеза (дiazотирования и азосочетания). Построенные в системе математические модели позволяют рассчитывать не только параметры состояния ХТП, но и определять их качественные показатели.

#### *Список использованных источников*

1. Грэхем И. Объектно-ориентированные методы. Принципы и практика. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 880 с.
2. Майстренко А.В., Майстренко Н.В., Вольщак И.Л. Разработка энерго- и ресурсосберегающей технологии непрерывного синтеза азопигментов // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. №. 3 (47). С.306-314.

#### *References*

1. Graham, I. Object-oriented methods. Principles and practice. Per. from English. – M.: Publishing house "Williams", 2004. – 880 p.
2. Maystrenko A.V., Maystrenko N.V., Wolsak I. L. Development of energy – saving technology of continuous synthesis of azo pigments // Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. 2013. №. 3 (47). P. 306-314.

УДК 621.391.2  
ББК 3.32.95

**Негуляева А. П.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **АЛГОРИТМ АВТОНОМНОГО КОНТРОЛЯ ЦЕЛОСТНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ СРНС. МЕТОД НЕВЯЗОК**

**Negulyaeva A. P.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **ALGORITHM FOR AUTONOMOUS NAVIGATION CONTROL DATA INTEGRITY SRNS. RESIDUAL METHOD**

*Аннотация.* Рассмотрен синтез автономных систем контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем для навигационных комплексов подвижных наземных объектов. Проанализирован алгоритм контроля целостности, основанный на методе суммирования невязок измерений в скользящем окне.

*Abstract.* The synthesis of autonomous integrity monitoring systems, navigation data of satellite navigation systems for navigation systems moving ground targets. It analyzed the integrity of the control algorithm based on the method of summation of residual measurements in a sliding window.

*Ключевые слова:* инерциальная навигационная система; автономная система контроля целостности.

*Keywords:* inertial navigation system; autonomous integrity monitoring system.

**Введение.** Для решения задач навигации как летательных аппаратов (ЛА), так и подвижных наземных объектов (ПНО) в последнее время широкое распространение получили навигационные комплексы, построенные на основе аппаратуры приема радиосигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) ГЛОНАСС и GPS [1, 2]. Использование в составе навигационного комплекса аппаратуры приема радиосигналов СРНС обеспечивает высокую точность определения координат местоположения и параметров движения воздушных и наземных объектов. Одной из задач, решаемой при использовании аппаратуры приема радиосигналов СРНС, является задача обеспечения целостности навигационных данных. Под целостностью в данном случае понимается способность навигационного комплекса обеспечить своевременное предупреждение о том, что данные СРНС значительно отличаются от истинных значений (являются неверными), и их не следует применять для целей навигации.

Для решения задач целостности навигационных данных СРНС используются системы контроля целостности навигационных данных. Широкое применение в навигаци-

онных комплексах получили автономные системы контроля целостности в виду их оперативности, автономности и независимости от внешнего канала передачи данных [3]. В качестве методов автономного контроля целостности используются методы оценок и фильтрационные методы [3].

В работах [4 – 6] для создания автономной системы контроля целостности навигационных данных СРНС в состав навигационного комплекса ПНО, включающего инерциальную навигационную систему (ИНС) и СРНС, был введен барометрический высотомер (БВ). Для обнаружения неверных данных СРНС использовался метод сравнения оценок постоянной составляющей погрешности измерения относительной высоты барометрическим высотомером и постоянной составляющей погрешности измерения ускорения инерциальной навигационной системой с заданными пороговыми значениями. Данные оценки получались в результате решения задачи синтеза методами оптимальной линейной фильтрации (фильтрации Калмана) [7].

**Цель работы:** для разработанной в работах [4 – 6] автономной системы контроля целостности навигационных данных СРНС методом статистического компьютерного моделирования проанализировать алгоритм автономного контроля целостности: зависимость размера скользящего окна в методе невязок измерений.

**Постановка задачи.** Постановку задачи оставим без изменения как в работах [4 – 6]. Пусть в состав навигационного комплекса наземного подвижного объекта входят ИНС, СРНС и БВ. Для создания автономной системы контроля целостности используем вертикальный канал, обеспечивающий определение высоты объекта.

**Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации.** Полученные в работах [4 – 6] уравнение наблюдения и модель изменения вектора состояния являются линейными. Оценка вектора состояния в соответствии с методами оптимальной линейной фильтрации определяется выражением [4, 5]

$$\begin{aligned} \mathbf{X}^*(t_{k+1}) = & \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k) + \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \mathbf{K}_1(t_{k+1}) [\xi_1(t_{k+1}) - \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \xi_1(t_k) - \\ & - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) + \varphi_{uu}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{H}_1(t_k) \mathbf{X}^*(t_k) - \mathbf{H}_1(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)] + \\ & + \mathbf{K}_2(t_{k+1}) [\xi_2(t_{k+1}) - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Psi(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}(t_k) - V_2 - \mathbf{H}_2(t_{k+1}) \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{X}^*(t_k)], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}_1(t_{k+1})$  и  $\mathbf{K}_2(t_{k+1})$  вектор столбцы размером  $(4 \times 1)$  матрицы оптимальных коэффициентов передачи  $\mathbf{K}(t_{k+1}) = [\mathbf{K}_1(t_{k+1}); \mathbf{K}_2(t_{k+1})]$ , определяемой соотношениями

$$\begin{aligned} \mathbf{K}(t_{k+1}) = & [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xy}] [\mathbf{B}_{yy} + \Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^{-1}; \\ \mathbf{P}(t_{k+1}) = & [\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{xx}^T(t_{k+1}, t_k) + \mathbf{B}_{xx}] - \mathbf{K}(t_{k+1}) [\mathbf{B}_{xy} + \Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{P}(t_k) \Phi_{yx}^T(t_{k+1}, t_k)]^T, \end{aligned} \quad (2)$$

в которых  $\mathbf{P}(t_{k+1})$  – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером  $(4 \times 4)$ ;  $\mathbf{B}_{xx}(t_{k+1}, t_k) = \Gamma_x(t_{k+1}, t_k) \Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)$ ;  $\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k)$ ,  $\mathbf{B}_{xy}$ ,  $\mathbf{B}_{yy}$  блочные матрицы вида

$$\Phi_{yx}(t_{k+1}, t_k) = \left[ \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k) - \Phi_{uu}(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1(t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Phi_{xx}(t_{k+1}, t_k)} \right];$$

$$\mathbf{B}_{xy} = [\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) | \Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1})];$$

$$\mathbf{B}_{yy} = \left[ \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1}) - \Phi_{uu}^2(t_{k+1}, t_k)}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_1^T(t_{k+1})} \right. \\ \left. \frac{\mathbf{H}_1(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1})}{\mathbf{H}_2(t_{k+1})\Gamma_x(t_{k+1}, t_k)\Gamma_x^T(t_{k+1}, t_k)\mathbf{H}_2^T(t_{k+1}) + \Gamma_2^2(t_k)} \right].$$

Полученные комплексные оптимальные алгоритмы (1), (2) позволяют оценивать относительную высоту ПНО, а также скорость ее изменения.

**Автономная система контроля целостности на основе метода невязок.** Для осуществления автономного контроля целостности навигационных данных СРНС используем метод суммирования невязок измерений в скользящем окне. Этот подход к обнаружению изменения анализируемой функции основан на ограничении интервала анализа дискретных отсчетов. В качестве анализируемого процесса выступает изменение сигнала  $H^{CPHC}(t_k)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , а в качестве анализируемой функции – функция  $J(t_k)$ , задаваемая формулой

$$J(t_k) = S(t_k) - S(t_{k-N}), \quad (3)$$

где  $N$  – число отсчетов, определяющих размер окна;  $S(t_k)$  – сумма невязок измерений, определяемая по формуле

$$S(t_k) = \sum_{i=1}^K [G_1(t_i) + G_2(t_i)], \quad (4)$$

в которой, в соответствии с выражением (1),

$$G_1(t_i) = H_{OTH}^{BB}(t_i) - \Phi_{uu} \cdot H_{OTH}^{BB}(t_{i-1}) - 0,5 \cdot T^2 \cdot a_Z^{ИНС}(t_{i-1}) + 0,5 \cdot T^2 \cdot g + \Phi_{uu} \cdot H_{OTH}^*(t_{i-1}) + \\ + \Phi_{uu} \cdot \Delta H^*(t_{i-1}) - H_{OTH}^*(t_{i-1}) - T \cdot V_Z^*(t_{i-1}) - \Delta H^*(t_{i-1}) + 0,5 \cdot T^2 \cdot \Delta_{aZ}^*(t_{i-1}) \quad (5)$$

$$G_2(t_i) = H^{CPHC}(t_i) - 0,5 \cdot T^2 \cdot a_Z^{ИНС}(t_{i-1}) + 0,5 \cdot T^2 \cdot g - R_0 - H_{OTH}^*(t_{i-1}) - T \cdot V_Z^*(t_{i-1}) + \\ + 0,5 \cdot T^2 \cdot \Delta_{aZ}^*(t_{i-1}) \quad (6)$$

Для определения оптимального размера окна было произведено компьютерное моделирование двух случаев – резкого и плавного изменения данных СРНС. Учитывая интервал дискретизации, равный 0,02 с, были построены графики зависимости амплитуды скачка анализируемой функции  $J(t_k)$  от размера окна при плавном (рис. 1) и при резком (рис. 2) изменении высоты.

Для оценки работоспособности предложенного алгоритма методом статистического компьютерного моделирования было проведено моделирование алгоритмов (1), (2), (3), (4) при тех же исходных данных СРНС, БВ, и ИНС.

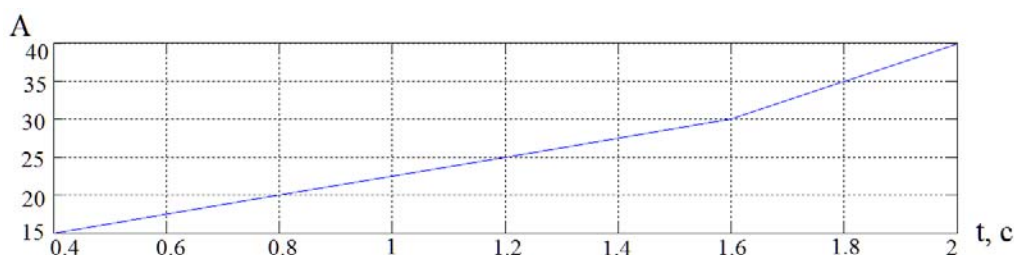


Рис. 1. Зависимость амплитуды от размера окна при плавном изменении данных СРНС

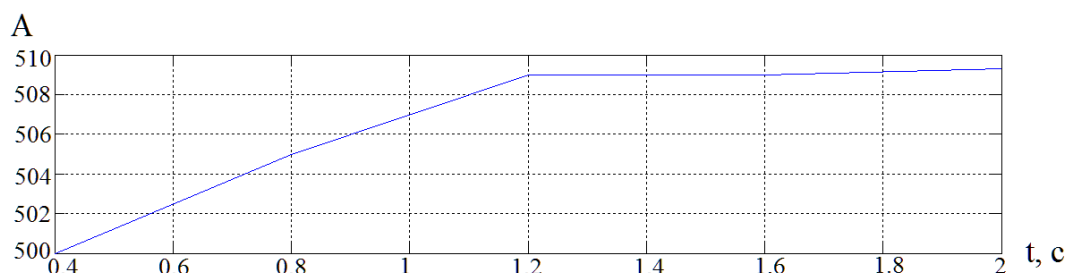


Рис. 2. Зависимость амплитуды от размера окна при резком изменении данных СРНС

Проанализировав результаты моделирования, представленные на рис. 1 и 2, величина окна выбрана равной 1,6 с. Сбой в работе НКА моделировался на двухсотой секунде. В ходе компьютерного моделирования были рассмотрены два случая. В первом случае – отказ навигационного спутника, приводящий к резкому изменению данных о высоте объекта (рис. 3), во втором – постепенное изменение по линейному закону (рис. 4).

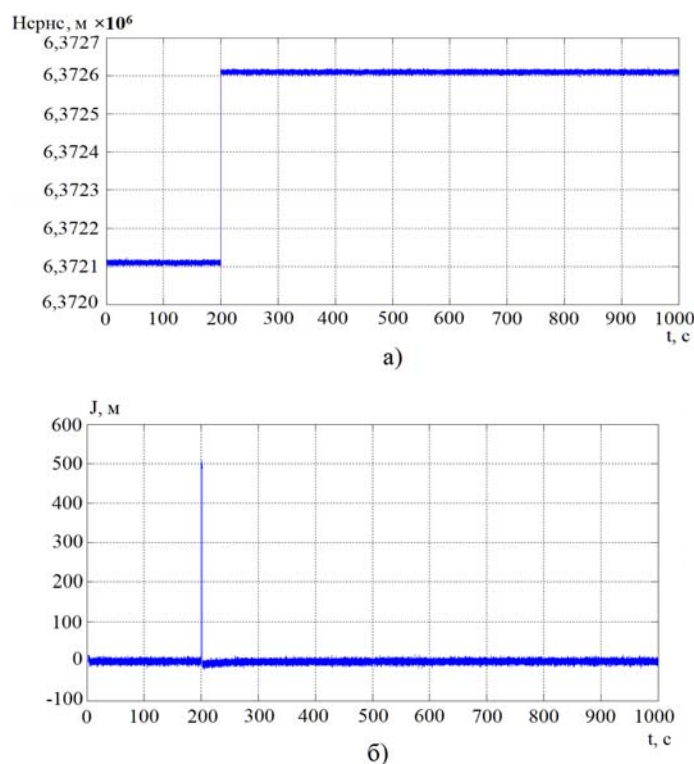
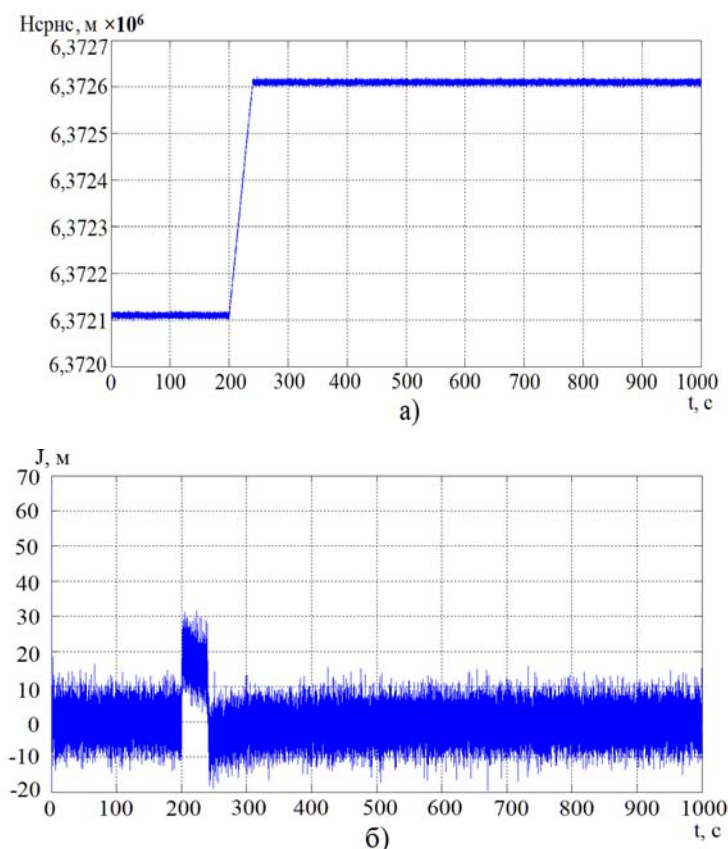


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования при резком изменении данных СРНС: сигнал СРНС (а), функция  $J(t_k)$  (б)



**Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования при плавном изменении данных СРНС: сигнал СРНС (а); функция  $J(t_k)$  (б)**

Результаты моделирования показали, что использование скользящего окна позволяет своевременно определить момент разладки, говорящий о наличии сбоя в работе аппаратуры приема сигналов СРНС. Основным настраиваемым параметром алгоритма является число элементов, определяющих размер окна. При использовании метода суммирования невязок измерений в скользящем окне для определения сбоя в работе НКА также необходимо задавать пороговое значение.

**Заключение.** Таким образом, в статье проанализирована зависимость амплитуды скачка функции  $J(t_k)$  от размера окна и выбран наиболее оптимальный размер скользящего окна. Это позволило оценить работу алгоритма контроля целостности, основанного на методе суммирования невязок измерений в скользящем окне.

#### *Список использованных источников*

1. Иванов, А. В. Обработка многомерных сигналов. Нелинейная многомерная обработка сигналов спутниковых радионавигационных систем в комплексах самолето-вождения. – М. : Радиотехника, 2012. – 176 с.
2. Иванов, А. В. Навигация наземных объектов / А. В. Иванов, Н. А. Иванова. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 с.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – 3-е изд., перераб. – М. : Радиотехника, 2005. – 688 с.

4. Иванов, А. В. Анализ работы алгоритмов обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения путем статистического компьютерного моделирования // Радиотехника. – 2011. – № 5. – С. 6 – 11.

5. Иванов, А. В. Алгоритмы обработки информации в навигационных системах наземных подвижных объектов с контролем целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, В. О. Сурков // Вопросы современной науки и практики «Университет имени В. И. Вернадского». Спецвыпуск. – 2014. – № 52. – С. 53 – 58.

6. Иванов, А. В. Точностные характеристики навигационных комплексов, использующих контроль целостности спутниковых радионавигационных систем для реконфигурации / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, С. П. Москвитин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 572 – 577.

7. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации. – М. : Радио и связь, 1985. – 344 с.

#### *References*

1. Ivanov, A. V. Processing of multidimensional signals. Nonlinear multidimensional signal processing of satellite navigation systems in aircraft navigation complexes – М. : Radiotekhnika, 2012. – 176 s.

2. Ivanov, A. V. Navigation ground objects / A. V. Ivanov, N. A. Ivanova. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 120 p.

3. GLONASS. The principles of construction and operation / pod red. A. I. Perova, V. N. Harisova. – Izd. 3-e, pererab. – М. : Radiotekhnika, 2005. – 688 p.

4. Ivanov, A. V. Analysis of the data processing algorithms in navigation systems, mobile ground targets with integrity control navigation support by statistical computer modeling // Radiotekhnika. – 2011. – N 5. – P. 6 – 11.

5. Ivanov, A. V. Algorithms for processing information in navigation systems with terrestrial mobile objects control the integrity of the navigation data of satellite radio navigation systems / A. V. Ivanov, D. V. Komrakov, V. O. Surkov // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki «Universitet imeni V. I. Vernadskogo». Specvypusk. – 2014. – N 52. – P. 53 – 58.

6. Ivanov, A. V. Performance characteristics of navigation systems using satellite navigation integrity monitoring systems for reconfiguration / A. V. Ivanov, D. V. Komrakov, S.P. Moskvitin // Vestnik TGTU. – 2015. – № 4. – P. 572 – 577.

7. Yarlykov, M. S. Statistical theory of navigation. – М. : Radio i svyaz', 1985. – 344 p.

УДК 621.391.26  
ББК 32.95

Подколзина Л. А.  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТИ  
УГЛОВОГО КАНАЛА НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Podkolzina L. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**DETERMINATION OF THE ACTUAL CHARACTERISTICS OF THE ACCURACY  
ANGULAR CHANNEL OF MOBILE GROUND OBJECT NAVIGATION SYSTEM**

*Аннотация.* В среде MatLab для алгоритмов определения углов курса, крена и тангажа в подвижных наземных объектах путем статистического моделирования произведено вычисление фактических характеристик точности.

*Ключевые слова:* алгоритмы, угловой канал, навигация.

*Abstract.* In MatLab for determining the course angle algorithms, pitch and roll in the mobile ground objects made calculation of actual accuracy performance by statistical modeling.

*Keywords:* algorithms, angular channel, navigation.

Для решения задач определения координат местоположения, параметров движения подвижного наземного объекта (ПНО) и пространственного положения его продольных осей (курса, крена и тангажа) используются навигационные системы [1].

Важнейшей задачей является определение пространственного положения продольной и поперечной осей ПНО.

Рассмотрим навигационную систему, в состав которой входят следующие датчики: курсовертикаль (КВ), датчики угловых скоростей (ДУС), цифровой магнитный компас (ЦМК) и аппаратура приема сигналов спутниковой радионавигационной системы (СРНС).

Применение методов марковской теории оценивания случайных процессов позволяет разрабатывать комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации. Данные методы были использованы для создания алгоритмов обработки информации в угловом канале навигационных систем ПНО в работе «Моделирование алгоритмов обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов» [2]. В данной работе оценивались курс  $\psi(t_k)$ , крен  $\gamma(t_k)$  и тангаж  $\vartheta(t_k)$ , которые были введены в вектор состояния  $\mathbf{X}_Y(t_k) = [\psi(t_k), \gamma(t_k), \vartheta(t_k), \Delta\psi(t_k), \Delta\gamma(t_k), \Delta\vartheta(t_k)]^T$  и оценивались совместно с погрешностью определения углов курса, крена и тангажа:  $\Delta\psi$ ,  $\Delta\gamma$  и  $\Delta\vartheta$ . Вектор состояния представлялся в виде двух векторов

$$\mathbf{X}_Y(t_k) = [\mathbf{X}_{1Y}^T(t_k), \mathbf{X}_{2Y}^T(t_k)]^T,$$

где  $\mathbf{X}_{1Y}(t_k) = [\psi(t_k), \gamma(t_k), \vartheta(t_k)]^T$  и  $\mathbf{X}_{2Y}(t_k) = [\Delta\psi(t_k), \Delta\gamma(t_k), \Delta\vartheta(t_k)]^T$ .

Комплексные алгоритмы обработки информации для определения оценки  $X_{2Y}^*(t_{k+1})$  вектора состояния  $X_{2Y}(t_{k+1})$  имели вид [2]:

$$\mathbf{X}_{2Y}^*(t_{k+1}) = \mathbf{X}_{2Y}^*(t_k) + \mathbf{K}_{2Y}(t_{k+1})[\Xi_{PY}(t_{k+1}) - \mathbf{X}_{2Y}^*(t_k)], \quad (1)$$

где  $\mathbf{K}_{2Y}(t_{k+1})$  – матрица оптимальных коэффициентов передачи размером  $(3 \times 3)$  определялась соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{2Y}(t_{k+1}) &= \mathbf{P}_{2Y}(t_k) [\mathbf{P}_{2Y}(t_k) + \Gamma_{2\Xi\Xi}(t_{k+1}) \Gamma_{2\Xi Y}^T(t_{k+1})]^{-1}, \\ \mathbf{P}_{2Y}(t_{k+1}) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{2Y}(t_{k+1})] \mathbf{P}_{2Y}(t_k), \end{aligned} \quad (2)$$

в которых  $\mathbf{P}_{2Y}(t_{k+1})$  – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером  $(3 \times 3)$ ;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица размером  $(3 \times 3)$ .

Оценка вектора  $\mathbf{X}_{1Y}(t_k)$  проводилась по наблюдениям СРНС и обозначалась как  $\mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_{k+1})$ , а также по наблюдениям КВ и обозначалась как  $\mathbf{X}_{1YKB}^*(t_{k+1})$ .

Расчет оценки  $\mathbf{X}_{1YKB}^*(t_{k+1})$  вектора состояния  $\mathbf{X}_{1Y}(t_{k+1})$  на основании наблюдений КВ выполнялся по формуле:

$$\mathbf{X}_{1YKB}^*(t_{k+1}) = \Xi_{1Y}(t_{k+1}) - \mathbf{X}_{2Y}^*(t_{k+1}). \quad (3)$$

Алгоритмы обработки информации для определения оценки  $\mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_{k+1})$  вектора состояния  $\mathbf{X}_{1Y}(t_{k+1})$  имели вид [2]:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_{k+1}) &= \mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_k) + \Psi_{1Y}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_Y(t_k) + \\ &+ \mathbf{K}_{1Y}(t_{k+1}) [\Xi_{3Y}(t_{k+1}) - \mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_k) - \Psi_{1Y}(t_{k+1}, t_k) \mathbf{W}_Y(t_k)], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{K}_{1Y}(t_{k+1})$  – матрица оптимальных коэффициентов передачи размером  $(3 \times 3)$  определяется соотношениями:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{1Y}(t_{k+1}) &= \mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1} | t_k) [\mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1} | t_k) + \Gamma_{3\Xi Y}(t_{k+1}) \Gamma_{3\Xi Y}^T(t_{k+1})]^{-1}, \\ \mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1} | t_k) &= \mathbf{P}_{1Y}(t_k) + \Gamma_{1XY}(t_{k+1}, t_k) \Gamma_{1XY}^T(t_{k+1}, t_k), \\ \mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1}) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}_{1Y}(t_{k+1})] \mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1} | t_k), \end{aligned} \quad (5)$$

в которых  $\mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1} | t_k)$  – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок прогнозирования размером  $(3 \times 3)$ ;  $\mathbf{P}_{1Y}(t_{k+1})$  – матрица вторых центральных моментов (ковариаций) ошибок оценивания размером  $(3 \times 3)$ ;  $\mathbf{I}$  – единичная матрица размером  $(3 \times 3)$ .

Оценка  $\mathbf{X}_{1Y}^*(t_{k+1})$  вектора состояния  $\mathbf{X}_{1Y}(t_{k+1})$  находилась, как среднее значение оценок  $\mathbf{X}_{1YKB}^*(t_{k+1})$  и  $\mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_{k+1})$  по формуле:

$$\mathbf{X}_{1Y}^*(t_{k+1}) = \frac{\mathbf{X}_{1YKB}^*(t_{k+1}) + \mathbf{X}_{1YCPHC}^*(t_{k+1})}{2}. \quad (6)$$

Для определения фактических характеристик точности (апостериорных дисперсий ошибок оценивания) было выполнено компьютерное моделирование разработанных алгоритмов. Блок-схема моделирования представлена на рис. 1.

Для определения фактических (реальных) характеристик точности оценивания использовались методы статистической обработки данных. При этом предполагалось, что смоделированные случайные процессы являются эргодическими. Дисперсия ошибки оценивания определялась в соответствии с выражением [3]:

$$D_x = \sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m_x)^2, \quad (7)$$

где математическое ожидание  $m_x$  ошибки оценивания находилось в соответствии с выражением [3]:

$$m_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}. \quad (8)$$



Рис. 1. Блок-схема компьютерного моделирования

В результате статистической обработки данных были получены следующие значения дисперсий ошибок оценивания:

$$\left. \begin{array}{l} \text{– для оценки } \mathbf{X}_{1Y}^*(t_{k+1}) \quad \left. \begin{array}{l} D_{\Psi} = 0,011550^{\circ} \\ D_{\gamma} = 0,011565^{\circ} \\ D_{\vartheta} = 0,010775^{\circ} \end{array} \right\} ; \\ \text{– для оценки } \mathbf{X}_{2Y}^*(t_{k+1}) \quad \left. \begin{array}{l} D_{\Delta\Psi} = 0,011212^{\circ} \\ D_{\Delta\gamma} = 0,011496^{\circ} \\ D_{\Delta\vartheta} = 0,010748^{\circ} \end{array} \right\} . \end{array} \right.$$

Таким образом, в работе были получены путем математического моделирования фактические характеристики точности синтезированных оптимальных алгоритмов, а именно: дисперсии ошибок оценивания.

#### *Список использованных источников*

1. Другов, К. М. Системы навигации наземных подвижных объектов / К. М. Другов, Л. А. Подколзина // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов ФГБОУ ВПО ТГТУ. – 2012. – № 3. – С. 203 – 207.
2. Подколзина, Л. А. Моделирование алгоритмов обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов // XXVII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях». 3 – 5 июня 2014 г. – Тамбов : ТГТУ, 2014.
3. Тихонов, В. И. Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.

#### *References*

1. Droogov, K. M. Navigation systems land mobile / K. M. Others, L. A. Podkolzina // Problems of technogenic safety and sustainable development: a collection of scientific papers of young scientists and students TSTU. – 2012. – N 3. – P. 203 – 207.
2. Podkolzina, L. A. Simulation data processing algorithms in navigation systems mobile land-based facilities // XXVII International Scientific Conference “Mathematical Methods in Engineering and Technology”. 3 – 5 June 2014. – Tambov : TSTU, 2014.
3. Tikhonov, V. I. Statistical radios. – 2<sup>nd</sup> ed., Rev. and ext. – M. : Radio and Communications, 1982. – 624 p.

УДК 631.3:631.115  
ББК 40.711

**Сазонова Д. Д., Сазонов С. Н.**

Всероссийский научно-исследовательский институт  
использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве  
(Россия, г. Тамбов)

## **АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ФУНКЦИИ, ПОСТРОЕННОЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ФЕРМЕРСКИХ ХОЗЯЙСТВ**

**Sazonova D. D., Sazonov S. N.**

All-Russian Research Institute for Use of Machinery and Petroleum Products in Agriculture  
(Russia, Tambov)

## **ANALYSIS OF PRODUCTION FUNCTION BASED ON RESULTS OF FARM ENTERPRISES' WORK**

*Аннотация.* В статье представлен анализ производственной функции, построенной по результатам, полученным в процессе многолетнего мониторинга деятельности фермерских хозяйств Тамбовской области.

*Ключевые слова:* крестьянские (фермерские) хозяйства; производственная функция, анализ, мониторинг.

*Abstract.* In this article we present analysis of the production function that has been built on the basis of results obtained in the course of long-term monitoring of farm enterprises' work in Tambov Oblast.

*Keywords:* farm enterprises, production function, analysis, monitoring.

Как известно, производственная функция представляет собой множественную регрессию результативного признака (результат производства) с независимыми переменными (затраты ресурсов). В данном случае экономико-математическая модель построена по данным, полученным сотрудниками ВНИИТиН в процессе мониторинга деятельности фермерских хозяйств Тамбовской области за 2001 – 2014 гг. [1 – 10]. На основании ранее проведенных исследований [11], в качестве переменных факторов в модель включены:  $X_1$  – площадь пашни (га);  $X_2$  – количество техники в хозяйстве (тракторы гусеничные и колесные, зерноуборочные комбайны и грузовые автомобили), шт.;  $X_3$  – затраты на приобретение топливно-смазочных материалов (ТСМ), тыс. р.;  $X_4$  – затраты на приобретение запасных частей, тыс. р.;  $X_5$  – затраты на приобретение семян, удобрений и прочих материалов и на оплату услуг сторонних организаций, тыс. р.;  $X_6$  – количество работников в хозяйстве, чел. Результирующей переменной  $Y$  принята выручка от реализации сельскохозяйственной продукции и продуктов ее переработки, тыс. р. Средние статистические характеристики ресурсов производства за период анализа приведены в табл. 1.

## 1. Статистические характеристики ресурсов производства

|       | Факторы (ресурсы)                                                                                         | Среднее значение, ( $\bar{x}$ ) | Средне-квадратическое отклонение, ( $\sigma$ ) | Ошибка репрезентативности, ( $\mu\%$ ) | Предельная ошибка выборки, ( $\Delta_x$ ) |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------|
| $X_1$ | Площадь пашни, га                                                                                         | 103,1                           | 122,1                                          | 6,7                                    | $\pm 8,8$                                 |
| $X_2$ | Количество техники (тракторы, комбайны и грузовые автомобили), шт.                                        | 2,8                             | 1,6                                            | 3,2                                    | $\pm 0,1$                                 |
| $X_3$ | Затраты на приобретение ТСМ, тыс. р.                                                                      | 55,2                            | 98,1                                           | 10,0                                   | $\pm 7,1$                                 |
| $X_4$ | Затраты на приобретение запасных частей, тыс. р.                                                          | 21,2                            | 41,1                                           | 11,0                                   | $\pm 2,9$                                 |
| $X_5$ | Затраты на приобретение семян, удобрений и прочих материалов, оплату услуг сторонних организаций, тыс. р. | 17,3                            | 43,2                                           | 14,1                                   | $\pm 3,1$                                 |
| $X_6$ | Количество работников в хозяйстве, чел.                                                                   | 2,0                             | 1,1                                            | 3,1                                    | $\pm 0,1$                                 |
| $Y$   | Выручка от реализации сельскохозяйственной продукции, тыс. р.                                             | 123,2                           | 249,9                                          | 11,5                                   | $\pm 18,1$                                |

Ошибка репрезентативности, рассчитанная при объеме генеральной совокупности  $N = 40\,014$  (количество фермерских хозяйств в Тамбовской области за 2001 – 2014 гг. в сумме), составила от 3,2% (для фактора  $X_2$ ) до 14,1% (для фактора  $X_5$ ). Объем выборки, использованной для построения производственной функции, гарантирует достоверность полученных результатов с вероятностью не менее 80%.

Для определения существенности колебаний значений факторов в зависимости от календарного года в производственную функцию введен дополнительный фактор – фиктивная переменная (dummy variable)  $D$ , которая определялась как  $D = 1, 2, \dots, 13, 14$  для данных, соответственно, за 2001, 2002, ... 2014 годы.

Судя по коэффициентам парной корреляции (таб. 2), корреляционная связь фиктивной переменной практически со всеми рассмотренными факторами незначительна, можно говорить о наличии связи календарного года только с факторами  $X_4$  и  $X_6$ . Так, с течением времени (увеличением фиктивной переменной) можно связать рост величины затрат на приобретение семян, удобрений и прочих материалов и снижение количества работников в хозяйстве.

## 2. Коэффициенты парной корреляции

|       | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $D$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| $X_1$ | 1     |       |       |       |       |       |     |
| $X_2$ | 0,64  | 1     |       |       |       |       |     |
| $X_3$ | 0,77  | 0,69  | 1     |       |       |       |     |
| $X_4$ | 0,66  | 0,62  | 0,76  | 1     |       |       |     |
| $X_5$ | 0,57  | 0,53  | 0,67  | 0,71  | 1     |       |     |
| $X_6$ | 0,70  | 0,62  | 0,65  | 0,57  | 0,55  | 1     |     |
| $D$   | 0,05  | -0,09 | 0,07  | 0,23  | 0,09  | -0,21 | 1   |

Значения коэффициентов парной корреляции между независимыми факторами ( $X_i$ ) находятся в диапазоне от  $r_{x_2x_5} = 0,53$  (связь факторов  $X_2$  – количество техники в хозяйстве и  $X_5$  – затраты на приобретение семян, удобрений и прочих материалов) до от  $r_{x_1x_3} = 0,77$  (связь факторов  $X_1$  – площадь пашни и  $X_3$  – затраты на приобретение ТСМ), что говорит о довольно тесной их связи, но мультиколлинеарность отсутствует, и, в принципе, все факторы, включая фиктивную переменную, могут быть включены в производственную функцию.

Для отбора факторов в производственную функцию проанализированы коэффициенты корреляции между факторами ( $X_i$  и  $D$ ) и результативной переменной ( $Y$ ) (табл. 3).

Все рассмотренные факторы, кроме фиктивной, очень сильно коррелируют с результативной переменной ( $Y$ ), причем наибольшая связь с фактором  $X_3$ , (затраты на приобретение ГСМ). Сопоставления полученных значений  $t$ -критерия и табличных показывают, что все коэффициенты корреляции при факторах  $X_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) имеют очень высокий уровень значимости (вероятность ошибки не превосходит  $\alpha = 0,001$ ).

## 3. Анализ коэффициентов корреляции

| Факторы (ресурсы) |                                                                                                           | Коэффициент корреляции $r_{yx_i}$ | $t$ -критерий | $\Delta$ |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------|----------|
| $X_1$             | Площадь пашни, га                                                                                         | 0,75                              | 20,0          | 30,3     |
| $X_2$             | Количество техники (тракторы, комбайны и грузовые автомобили), шт.                                        | 0,70                              | 17,1          | 23,8     |
| $X_3$             | Затраты на приобретение ТСМ, тыс. р.                                                                      | 0,86                              | 30,1          | 59,7     |
| $X_4$             | Затраты на приобретение запасных частей, тыс. р.                                                          | 0,82                              | 25,3          | 44,2     |
| $X_5$             | Затраты на приобретение семян, удобрений и прочих материалов, оплату услуг сторонних организаций, тыс. р. | 0,81                              | 24,6          | 21,4     |
| $X_6$             | Количество работников в хозяйстве, чел.                                                                   | 0,68                              | 16,1          | 21,8     |
| $D$               | Фиктивная переменная                                                                                      | 0,10                              | 1,9           | 1,9      |

Коэффициент корреляции фиктивной переменной ( $D$ ) можно признать по  $t$ -критерию только относительно значимым. Поэтому имеет смысл проверить существенность корреляционной связи, используя отношение коэффициента корреляции к его средней квадратической ошибке ( $\Delta$ ).

Полученные значения  $\Delta$  для всех факторов  $X_i$  значительно выше трех, и это подтверждает существенной их связи с результирующей переменной. Для фиктивной переменной значение  $\Delta$  меньше трех, поэтому влияние этой переменной на результирующую следует признать статистически незначимым. Следовательно, изменения факторов в зависимости от календарного года можно считать несущественными для рассматриваемой зависимости.

Производственная функция, полученная после исключения из расчетов фиктивной переменной, имеет вид:

$$Y = 4,88 \cdot X_1^{0,119} X_2^{0,234} X_3^{0,29} X_4^{0,154} X_5^{0,261} X_6^{0,163}. \quad (1)$$

Коэффициент множественной корреляции составил  $R=0,935$ . Расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{эмп}} = 353$  (табл. 4), а табличное (при 1% уровне значимости для числа степеней свободы  $m = 6$  и  $n = 311$ ) –  $F_{\text{кр}} = 2,89$ . И, так как  $F_{\text{эмп}} > F_{\text{кр}}$ , можно утверждать, что коэффициент множественной корреляции статистически значим (значимость  $F$ -критерия 0,000), и совокупное влияние рассмотренных факторов производства на результирующую переменную существенно.

#### 4. Оценка коэффициентов производственной функции

| Факторы (ресурсы) |                                                                                                           | Коэффициент уравнения регрессии $b_i$ | $t$ -критерий | Весомость фактора, % |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------|----------------------|
| $X_1$             | Площадь пашни, га                                                                                         | 0,119                                 | 2,5           | 9,7                  |
| $X_2$             | Количество техники (тракторы, комбайны и грузовые автомобили), шт.                                        | 0,234                                 | 2,7           | 19,2                 |
| $X_3$             | Затраты на приобретение ТСМ, тыс. р.                                                                      | 0,290                                 | 8,7           | 23,8                 |
| $X_4$             | Затраты на приобретение запасных частей, тыс. р.                                                          | 0,154                                 | 5,3           | 12,6                 |
| $X_5$             | Затраты на приобретение семян, удобрений и прочих материалов, оплату услуг сторонних организаций, тыс. р. | 0,261                                 | 10,8          | 21,4                 |
| $X_6$             | Количество работников в хозяйстве, чел.                                                                   | 0,163                                 | 1,6           | 13,3                 |
|                   | Свободный член уравнения                                                                                  | 4,88                                  | 11,0          |                      |
|                   | Коэффициент детерминации ( $R^2$ )                                                                        | 0,875                                 |               |                      |
|                   | Критерий Фишера ( $F$ )                                                                                   | 353                                   |               |                      |

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,875$ , т.е. 87,5% вариаций объясняются факторами, включенными в уравнение регрессии. Значения  $t$ -критерия для коэффициентов полученной зависимости показывает, что все они статистически значимы, т.е. взаимосвязь этих факторов с результирующей переменной является существенной.

Наименее значимым – уровень значимости (вероятность ошибки)  $\alpha = 0,05$  – является коэффициент при факторе  $X_6$  (количество работников в хозяйстве). Остальные оценки коэффициентов функции существенно отличны от нуля (на уровне  $\alpha = 0,01$  и ниже).

Наиболее эластичным является фактор  $X_3$  (затраты на приобретение топливно-смазочных материалов) – увеличение его на 1% приведет к увеличению результирующего фактора на 0,29%, наименее эластичен ресурс  $X_1$  (площадь пашни).

Все коэффициенты уравнения положительные, сумма их составляет 1,221, что означает возрастающий эффект масштаба. Если принять эту сумму за 100%, то можно сказать, что весомость влияния на увеличение валовой выручки от реализации сельскохозяйственной продукции таких факторов как обеспеченность техникой ( $X_2$ ) и топливно-смазочными материалами ( $X_3$ ) составляет в общей сложности 43%.

#### *Список использованных источников*

1. Кузьмин, В. Н. и др. Справочник экономиста сельскохозяйственной организации / В. Н. Кузьмин и др. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2012.
2. Остриков, В. В. и др. Доступность и повышение эффективности использования нефтепродуктов в фермерских хозяйствах / В. В. Остриков и др. // АПК России. – 2014. – Т. 68. – С. 76 – 83.
3. Сазонов, С. Н. Оценка эффективности использования производственно-технических ресурсов в фермерских хозяйствах / С. Н. Сазонов, Д. Д. Сазонова // Вестник МичГАУ. – 2014. – № 1. – С. 96 – 103.
4. Ерохин, Г. Н. и др. Моделирование показателей использования зерноуборочных комбайнов ACROS 530 и VECTOR 410 / Г. Н. Ерохин и др. // АПК России. – 2013. – Т. 65. – С. 114 – 117.
5. Сазонова, Д. Д. О соразмерности социальных платежей и результатов деятельности фермерских хозяйств / Д. Д. Сазонова, С. Н. Сазонов // Человек и труд. – 2013. – № 7.
6. Сазонов, С. Н. Оценка технической эффективности фермерских хозяйств / С. Н. Сазонов, Д. Д. Сазонова // АПК России. – 2014. – Т. 69. – С. 117 – 125.
7. Сазонова, Д. Д. Оценка эффективности использования производственно-технических ресурсов в фермерских хозяйствах / Д. Д. Сазонова, С. Н. Сазонов // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2014. – № 1. – С. 96 – 103.
8. Сазонова, Д. Д. Противоречия в нормативно-правовом обеспечении деятельности фермерских хозяйств // Вестник МичГАУ. – 2012. – № 3. – С. 229 – 234.
9. Ерохин Г. Н., и др. О надежности работы современных зерноуборочных комбайнов / Г. Н. Ерохин и др. // Вестник МичГАУ. – 2013. – № 6. – С. 59 – 63.
10. Сазонов, С. Н. Методология эффективного формирования и использования производственных ресурсов в крестьянских (фермерских) хозяйствах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Саратов, 1998. – 48 с.

### *References*

1. Kuz'min, V. N. et al. Reference economist Agriculture Organization / V. N. Kuz'min et al. – M. : FGBNU "Rosinformagroteh", 2012.
2. Ostrikov, V. V. et al. The availability and efficient use of oil in farms / V. V. Ostrikov et al. // AIC-2014 Russian. – V. 68. – P. 76 – 83.
3. Sazonov, S. N. Evaluating the effectiveness of the use of technological resources in farms / S. N. Sazonov, D. D. Sazonov // Herald MichGAU. – 2014. – N 1. – P. 96 – 103.
4. Erokhin, G. N. et al. Modeling the use of indicators combine harvesters ACROS 530 and VECTOR 410 / G. N. Erokhin et al. // Russian agribusiness. – 2013. – V. 65. – P. 114 – 117.
5. Sazonov, D. D. On the proportionality of payments and social activity of farms results / D. D. Sazonov, S. N. Sazonov // Man and trud. – 2013. – N 7.
6. Sazonov, S. N. Evaluation of the technical efficiency of farms / S. N. Sazonov, D. D. Sazonov // AIC Russia. – 2014. – V. 69. – P. 117 – 125.
7. Sazonov, D. D. Evaluating the effectiveness of the use of technological resources in farms / D. D. Sazonov, S. N. Sazonov // Herald Michurinsk State Agrarian University. – 2014. – N 1. – P. 96 – 103.
8. Sazonov, D. D. The contradictions in the legal provision of activity of farms // Herald MichGAU. – 2012. – N 3. – P. 229 – 234.
9. Erokhin, G. N. et al. Reliability of operation of modern combine harvesters / G. N. Erokhin et al. // Herald MichGAU. – 2013. – N 6. – P. 59 – 63.
10. Sazonov, S. N. Methodology of formation and effective utilization of productive resources (peasant) farms : Abstract. dis. ... dts. – Saratov, 1998. – 48 p.

УДК 519.688  
ББК 0145

**Фролов С. В., Синдеев С. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ В ЭКОЛОГИИ**

**Frolov S. V., Sindeev S. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **USING HIGH-PERFORMANCE COMPUTING FOR SOLVING THE FLUID MECHANICS PROBLEMS IN ECOLOGY**

*Аннотация.* Рассмотрены технологии высокопроизводительных вычислений, применяемые при решении задач в экологии, проанализированы их достоинства и недостатки. Описаны современные комплексы программ для решения задач механики сплошной среды

*Ключевые слова:* механика сплошной среды; математическое моделирование; параллельные вычисления.

*Abstract.* The technologies of high-performance computing, used for solving environmental problems are considered. Analyze of their strengths and weaknesses is presented. The modern software complexes for solving continuum mechanics problems are reviewed.

*Keywords:* fluid mechanics; mathematical modeling; parallel computing.

Широкое применение методов механики сплошной среды к решению экологических проблем связано в первую очередь с развитием методов вычислительной гидродинамики. Методы вычислительной гидродинамики могут быть применены для решения уравнений переноса для рек, озер, океанов, атмосферы и т.д. [1 – 4]. Идея использования компьютеров для моделирования атмосферных потоков очевидна, однако первые попытки адаптировать известные в промышленности подходы к решению подобных задач не имели успеха, так как решение задачи движения атмосферных потоков приводит к ряду проблем, которые отсутствуют в промышленности: исходная область расчета и граничные условия не всегда известны; коэффициенты сопротивления формы изменяются во времени и пространстве в результате сложного взаимодействия между поверхностью и потоком; область расчета не может быть аппроксимирована поверхностью простой формы. Вышеизложенное не означает, что методы вычислительной гидродинамики не могут быть использованы для численных экспериментов в задачах экологии, однако требуется детальный подход при постановке задачи исследования и сравнение с результатами натурных экспериментов.

В настоящее время можно выделить следующие технологии высокопроизводительных вычислений применяемые для решения задач механики сплошной среды в экологии: Open MP и Open MPI. Технология Open MP предназначена для распараллеливания вычисления исходной задачи на несколько потоков на многопроцессорной (многоядерной) вычислительной системе с общей памятью. При этом выделяется главный поток, который создает множество подчиненных потоков, между которыми происходит распределение вычислительной задачи и обмен данными. К достоинствам технологии следует отнести простоту написания параллельных программ для сложных вычислений, возникающих при решении экологических задач, достигаемую за счет добавления специальных директив компилятора в уже написанную последовательную версию программы на языке C/C++ или Fortran. Помимо этого использование общей памяти между работающими потоками позволяет достичь максимального прироста производительности при обмене данными между потоками. Однако данная технология имеет существенный недостаток – работа в системах с общей памятью предполагает наличие гораздо меньшего количества одновременно работающих вычислителей, чем в системах с распределенной памятью, вследствие чего коэффициент ускорения параллельных программ, написанных с применением технологии Open MP до недавнего времени был сравнительно невелик. Для устранения этой проблемы компанией Intel в 2012 г. была выпущена серия вычислительных сопроцессоров под названием Xeon Phi, построенных на архитектуре Intel MIC. Сопроцессор представляет собой внешний модуль, содержащий более 60 ядер x86 и подключающийся к материнской плате по интерфейсу PCI-Express, благодаря чему достигается высокая скорость обмена данными между центральным процессором и сопроцессором Xeon Phi. При этом технология Open MP полностью берет на себя работу по управлению сопроцессором, благодаря чему внесение дополнительных изменений в код программы не требуется.

В отличие от архитектур с общей памятью, программы для решения сложных экологических проблем используют вычислительные архитектуры с распределенной памятью на основе технологии Open MPI. В архитектурах с распределенной памятью параллельно работающие потоки могут находиться на нескольких удаленных компьютерах, объединенных высокоскоростным интерфейсом для обмена данными между потоками. Такая группа компьютеров образует вычислительный кластер. Из-за того, что работающие вычислительные потоки не имеют общей разделяемой памяти, для передачи данных между потоками требуется пересылка данных между компьютерами по специальному интерфейсу, например Infini Band, что существенно сокращает коэффициент ускорения работы при интенсивном обмене данными между вычислительными потоками. Однако системы с распределенной памятью, как правило, имеют гораздо большее количество вычислителей в своем составе по сравнению с системами с общей памятью, что дает возможность увеличить скорость выполнения расчета экологической задачи в сотни и тысячи раз.

Разработка и поддержка работы собственного вычислительного кластера представляет собой значительную финансовую проблему. Стоит отметить, что наиболее экономичным способом применения высокопроизводительных кластеров для расчета слож-

ных экологических задач является использование удаленного доступа к уже работающему суперкомпьютеру [5].

Помимо рассмотренных технологий параллельных вычислений на центральном процессоре, для решения задач механики сплошной среды в экологии, перспективным является использование технологии гетерогенных вычислений NVIDIA CUDA, разработанной компанией NVIDIA. Технология предполагает расчет уравнений математической модели не на центральном процессоре, а на специальном графическом ускорителе или видеокарте, поддерживающей технологию NVIDIA CUDA. Современные видеокарты содержат более 600 ядер CUDA с частотой более 1 GHz, что позволяет значительно увеличить скорость расчета уравнений математических моделей в задачах экологии.

Среди программных комплексов, используемых для расчета уравнений математических моделей механики сплошной среды, следует выделить комплексы Open FOAM и ANSYS Fluent. Программный комплекс Open FOAM является открытым универсальным средством для решения задач вычислительной гидродинамики. Комплекс используется для моделирования механики сплошной среды с помощью метода конечных объемов. Достоинствами комплекса является его открытость, расширяемость и возможность параллельного расчета уравнений математической модели с использованием технологии Open MPI.

Признанным лидером в области вычислительной гидродинамики, нашедшим свое применение при решении задач экологии является коммерческий программный комплекс ANSYS Fluent. Комплекс поддерживает решение полного спектра задач, связанных с расчетом математических моделей в экологии: препроцессинг, создание вычислительной сетки, настройка и задание граничных условий, выбор математической модели, выбор и настройка решателя, решение уравнений математической модели, постпроцессинг. К достоинствам комплекса следует отнести широкий функционал, надежность, возможность параллельного выполнения расчета на вычислительном кластере. Недостатком программного комплекса является его высокая стоимость и закрытость исходного кода приложения, что осложняет внесение изменений в расчетные модули.

В последнее десятилетие применение вычислительных экспериментов для решения задач экологии значительно увеличилось, что связано с ростом вычислительной мощности компьютеров, что позволило проводить высокоточный расчет потоков над поверхностями со сложной топологией.

#### *Список использованных источников*

1. Jeanjean, A. P. R. A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale / A. P. R. Jeanjean, G. Hinchliffe, W. A. McMullan et. al. // Atmospheric Environment. – 2015. – V. 120. – P. 1 – 14.
2. Abhijith, K.V. Passive control potentials of trees and on-street parked cars in reduction of air pollution exposure in urban street canyons / K. V. Abhijith, S. Gokhale // Environmental Pollution. – 2015. – V. 204. – P. 99 – 108.

3. Zhong, J. Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review / J. Zhong, Xiao-Ming Cai, W. Bloss // *Environmental Pollution*. – 2016. – V. 214. – P. 690 – 704.
4. Hagler, G. Simulation of rail yard emissions transport to the near-source environment / G. Hugler, W. Tang // *Atmospheric Pollution Research*. – 2016. – V. 7, N 3. – P. 469 – 476.
5. Воеводин, Вл. В. Практика суперкомпьютера «Ломоносов» / Вл. В. Воеводин, С. А. Жуматий, С. И. Соболев и др. // *Открытые системы*. – М. : Издательский дом «Открытые системы», 2012. – № 7. – С. 36 – 39.

#### *References*

1. Jeanjean, A. P. R. A CFD study on the effectiveness of trees to disperse road traffic emissions at a city scale / A. P. R. Jeanjean, G. Hinchliffe, W. A. McMullan et. al. // *Atmospheric Environment*. – 2015. – V. 120. – P. 1 – 14.
2. Abhijith, K.V. Passive control potentials of trees and on-street parked cars in reduction of air pollution exposure in urban street canyons / K. V. Abhijith, S. Gokhale // *Environmental Pollution*. – 2015. – V. 204. – P. 99 – 108.
3. Zhong, J. Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review / J. Zhong, Xiao-Ming Cai, W. Bloss // *Environmental Pollution*. – 2016. – V. 214. – P. 690 – 704.
4. Hagler, G. Simulation of rail yard emissions transport to the near-source environment / G. Hugler, W. Tang // *Atmospheric Pollution Research*. – 2016. – V. 7, N 3. – P. 469 – 476.
5. Voevodin, Vl. V. Practice on supercomputer “Lomonosov” / Vl. V. Voevodin, S. A. Zhumatiy, S. I. Sobolev et al. // *Open Systems*. – М. : Publishing House “Open Systems”, 2012. – N 7. – P. 36 – 39.

УДК 621.357  
ББК 34.663

**Литовка Ю. В., Као В. З.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ВАННЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ КАТОДАМИ И БИПОЛЯРНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОНОМИИ МЕТАЛЛОВ ПОКРЫТИЯ**

**Litovka Yu. V., Cao V. D.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **OPTIMIZATION OF ELECTROPLATING BATH WITH ADDITIONAL CATHODES AND BIPOLAR ELECTRODES FOR ENERGY CONSERVATION AND SAVING THE COATING OF METALS**

*Аннотация.* Представлена эффективность энергосбережения и экономии металлов покрытия при использовании дополнительных катодов и биполярных электродов в гальванической ванне.

*Ключевые слова:* дополнительный катод, биполярный электрод, энергосбережение, оптимизация.

*Abstract.* The efficiency of energy saving and conservation of metal coatings with the use of additional cathodes and bipolar electrodes in a galvanic bath.

*Keywords:* supplementary cathode, bipolar electrode, energy saving, optimization.

Много металлоконструкций, машин, приборов и другого изготовленного из металла оборудования эксплуатируется в атмосфере и негативных условиях. При этом такие свойства металлов, как твердость, износостойкость, коррозионная стойкость, декоративность постепенно ухудшаются во времени. Это вызывает огромные потери металлов, и требуются научные методы для их защиты и повышения их качества. Для придания поверхности металла указанных специальных свойств применяют гальванические покрытия. Одним из самых важнейших свойств гальванических покрытий является равномерность.

Для улучшения равномерности гальванических покрытий существует ряд способов, осуществляемых с использованием реверсивного источника тока; многоанодных гальванических ванн; фигурного анода и др.

В данной работе рассматривается оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами и биполярными электродами для энергосбережения и экономии металлов покрытия. Использование комбинации дополнительных катодов и биполярных электродов улучшает равномерность при нанесении гальванических покрытий. При этом способствует повышению качества и времени эксплуатации металла.

В качестве критерия оптимизации используется критерий неравномерности распределения толщины покрытия, который рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i(x, y, z) - \delta_{\min}}{\delta_{\min}}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\min}$  – минимальная толщина покрытия;  $\delta_i(x, y, z)$  – толщина покрытия в точке катода с координатами  $x, y, z$ ;  $m$  – количество точек, в которых вычисляется толщина покрытия;

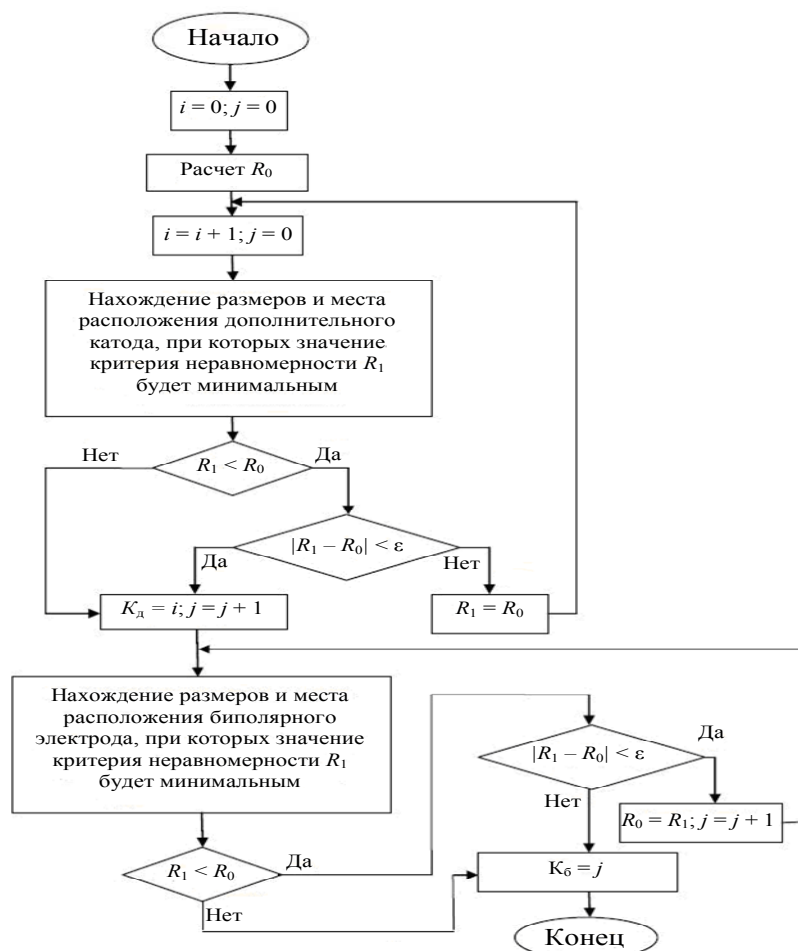
Математическая постановка задачи звучит следующим образом. Найти количество дополнительных катодов, биполярных электродов, их размеры и место их расположения в пространстве гальванической ванны, доставляющих минимум критерию неравномерности (1):  $R \rightarrow \min$ .

Количество дополнительных катодов и биполярных электродов ищется алгоритмом, представляемым на рис. 1.

Для нахождения их оптимальных размеров и места расположения в гальванической ванне используется метод полного перебора или градиентного спуска.

Результаты решения различных примеров подтверждают, что с помощью дополнительных катодов и биполярных электродов на поверхности основного катода снижение неравномерности по сравнению с традиционным процессом получается на 15...18%.

Таким образом, для энергосбережения и экономии металлов в гальванотехнике возможно использовать гальваническую ванну с дополнительными катодами и биполярными электродами.



**Рис. 1. Алгоритм нахождения количества дополнительных катодов и биполярных электродов**

УДК 534.2  
ББК 387; А724

**Яровая Т. С., Антонов А. И.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ЗВУКА  
ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ ШУМОВОГО РЕЖИМА  
В ЗДАНИЯХ С МАССОВЫМ ПРЕБЫВАНИЕМ ЛЮДЕЙ**

**Yarovaya T. S., Antonov A. I.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**MATHEMATICAL MODELING OF DIRECT SOUND IN THE ENVIRONMENTAL  
ASSESSMENT OF THE NOISE REGIME IN THE BUILDINGS  
WITH THE MASSIVE PRESENCE OF PEOPLE**

*Аннотация.* В настоящей статье предложена методика, которая может быть применена для анализа шумового режима помещений с большим скоплением людей и использована для разработки мероприятий по снижению шума.

*Ключевые слова:* прямой звук, экологическая оценка шума, здания с массовым пребыванием людей.

*Abstract.* In the present article the technique which can be applied to the analysis of the noise mode of rooms with a big congestion of people is offered and used for development of actions for noise reduction.

*Keywords:* direct sound, ecological assessment of noise, buildings with mass stay of people.

Человек является неотъемлемой частью общества, и, как следствие, большую часть жизни проводит в местах скопления людей, будь то поход в магазин или на стадион или отъезд в командировку с вокзала. Сопутствующий таким местам шум, создаваемый разговорами людей между собой и передвижениями, негативно сказывается на состоянии человека – появляется усталость, раздражительность, рассеивается внимание. В настоящее время не существует методик, которые позволили бы объективно оценивать этот шум, учитывая все особенности протекающего функционального процесса, а именно случайное положение говорящих, как за счет перемещения, так и за счет непостоянства и прерывистости речи, и случайное направление сигнала (речи).

Большинство методов расчета звуковых полей помещений ориентировано на поля ограниченного количества локальных источников шума с детерминированными параметрами: с определенным пространственным положением и с известными временными акустическими характеристиками. При этом нестационарную акустическую мощность часто заменяют эквивалентной по энергии постоянной мощностью.

Акустические характеристики речи (спектральный состав, направленность, уровень акустической мощности) в значительной степени зависит от возраста, пола и индивиду-

альных особенностей говорящего. Отклонение уровня звука от усредненных значений могут составлять  $\pm 6$  дБ. Для характеристик речи используют типовые интегральные уровни речевых сигналов с линейным усреднением:  $L_s = 64$  дБ – тихая речь;  $L_s = 70$  дБ – речь средней громкости;  $L_s = 76$  дБ – громкая речь [1]. Спектральная характеристика речевого сигнала на расстоянии 1 м от источника сигнала приведена в табл. 1.

Характеристика направленности приближенно описывается аналитическим выражением [2]:

$$\Phi_{(\theta)} = \frac{1}{2}(1 + \cos(\theta / 2)), \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол между акустической осью источника и направлением на расчетную точку.

Выражение (1) относится к звуковому давлению, поэтому фактор направленности равен

$$\Phi_{(\theta)}^2 = 0,25(1 + \cos(\theta / 2))^2. \quad (2)$$

Коэффициент осевой концентрации при симметричной характеристике (1) равен

$$\Omega = \frac{4\pi}{\int_0^\pi \Phi_{(\theta)}^2 2\pi \sin \theta d\theta} = 1,41. \quad (3)$$

Уровень акустической мощности речи можно определить из выражения для уровня прямого сигнала

$$L = L_p + 10 \lg \left( \frac{F\Omega}{4\pi r^2} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – расстояние от источника шума до расчетной точки. При  $r = 1$ ,  $F = 1$ ,  $\Omega = 1,41$  и на основе данных табл. 1 уровень акустической мощности равен

$$L_p = L + 9,5, \quad (5)$$

где  $L$  – уровень звукового давления речи напротив говорящего на расстоянии  $r = 1$  м.

### 1. Типовые уровни речевого сигнала

| № | Среднегеометрическая частота<br>октавной полосы, Гц | Частотный спектр речи, дБ,<br>для типовых интегральных уровней |               |               |
|---|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|   |                                                     | $L_s = 64$ дБ                                                  | $L_s = 70$ дБ | $L_s = 76$ дБ |
| 1 | 125                                                 | 47                                                             | 53            | 59            |
| 2 | 250                                                 | 60                                                             | 66            | 72            |
| 3 | 500                                                 | 60                                                             | 66            | 72            |
| 4 | 1000                                                | 55                                                             | 61            | 67            |
| 5 | 2000                                                | 50                                                             | 56            | 62            |
| 6 | 4000                                                | 47                                                             | 53            | 59            |
| 7 | 8000                                                | 49                                                             | 49            | 55            |

Согласно сформулированной задаче требуется рассчитать уровень прямого звука от большого количества разговаривающих людей, равномерно и случайно заполнивших пространство помещения. Направление речи так же считается случайным. Источники шума удобно задавать через плотность людей  $p$  и долю одновременно разговаривающих  $K_{од}$ . Например, в залах ожидания железнодорожных вокзалов коэффициент равен  $K_{од} = 0,4 \dots 0,5$ , при проведении спортивных мероприятий коэффициент  $K_{од}$  может быть больше 0,5, но в большинстве помещений  $K_{од} < 0,4$ . Плотность людей может колебаться в значительных пределах, от  $p = 1/2 \dots 1/1$  человек/м<sup>2</sup> в пиковые моменты до значительно меньших значений  $p = 1/10 \dots 1/20$  человек/м<sup>2</sup>. Общее количество источников шума является достаточно большим, но ограниченным известными ограничениями, что допускает использование различных расчетных методов и моделей для оценки прямого звука.

Расчет прямого звука в помещениях с однотипными стохастическими источниками шума может успешно реализован непосредственно путем математического моделирования, так как количество элементов системы (источников шума) не превышает несколько сотен, что легко моделируется компьютерной техникой. При этом может быть использован численный метод, алгоритм которого представлен на примере решения задачи.

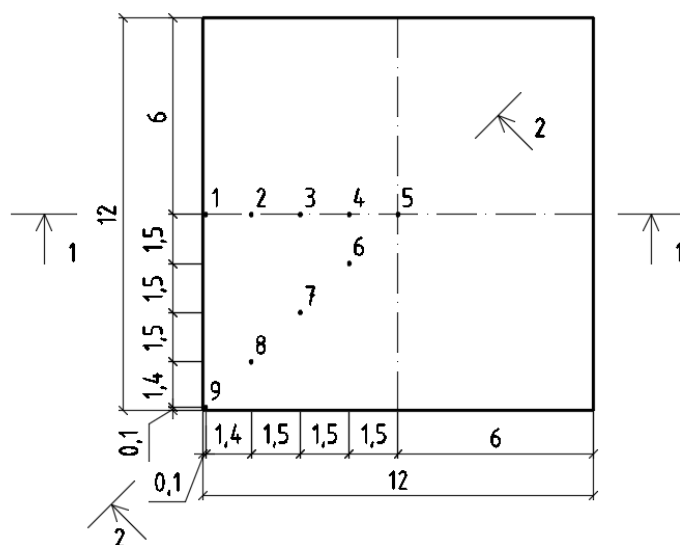
*Пример.* Рассчитать уровень прямого звука в характерных точках зала с размерами  $a \times b = 12 \times 12$  м для частоты  $f = 500$  Гц. Плотность пассажиров в зале  $g = 1/4$  человек/м<sup>2</sup>, коэффициент одновременности разговора  $K_{од} = 0,5$ , речь средней громкости с линейным по энергии уровнем  $L_s = 70$  дБ. Схема помещения с указанием расчетных точек показана на рис. 1.

Количество людей в зале  $N_0 = Sg = 12 \cdot 12 \cdot 1/4 = 36$  человек. Из них одновременно разговаривают

$$N = N_0 K_{од} = 36 \cdot 0,5 = 18 \text{ человек.}$$

Акустическая мощность каждого говорящего составит

$$L_p = 66 + 9,5 = 75,5 \text{ (дБ).}$$



**Рис. 1. Расчетная схема помещения с положением расчетных точек**  
(1 – 9 – номера расчетных точек)

Все  $N_0$  пассажиров случайным образом расставляются по залу  $M_0$  раз, их координаты устанавливаются с помощью функции (генератора) случайных чисел RND с равномерным распределением вероятности событий в диапазоне  $\{0 \dots 1\}$ .

$$\begin{aligned}x_i &= RND a; \\y_i &= RND b,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $i \in \{1 \dots N_0\}$ .

Угол между направлением разговора и направлением на расчетную точку так же устанавливается случайно

$$\theta = 2\pi RND.\tag{2}$$

Каждый пассажир говорит при

$$RND \leq K_{\text{од}} \Rightarrow K_0 = 1\tag{3}$$

или молчит в обратном случае,  $K_0 = 0$ , где  $K_0$  – коэффициент, учитывающий прерывистый во времени характер речи.

Уровни звукового давления в расчетной точке рассчитываются в результате численного метода на основе выражения (4)

$$L_t = L_p + 10 \lg \left[ \frac{1}{M} \sum_{M_0} \sum_{N_0} K_0 \frac{0,25(1 + \cos(\theta/2))^2 \Omega}{4\pi((x_i - x_t)^2 + (y_i - y_t)^2)} \right],\tag{4}$$

где  $x_t, y_t$  – координаты расчетной точки.

При расчете уровней прямого звука в программе не учитывается вклад источников шума, находящихся ближе 1 м от расчетной точки. Это ограничение введено по двум причинам, во-первых, более близкое расположение источника звука и слушателя в общественных местах не слишком распространенное явление и, во-вторых, приводит к резкому возрастанию уровней звука и случайным выбросам в результатах расчета.

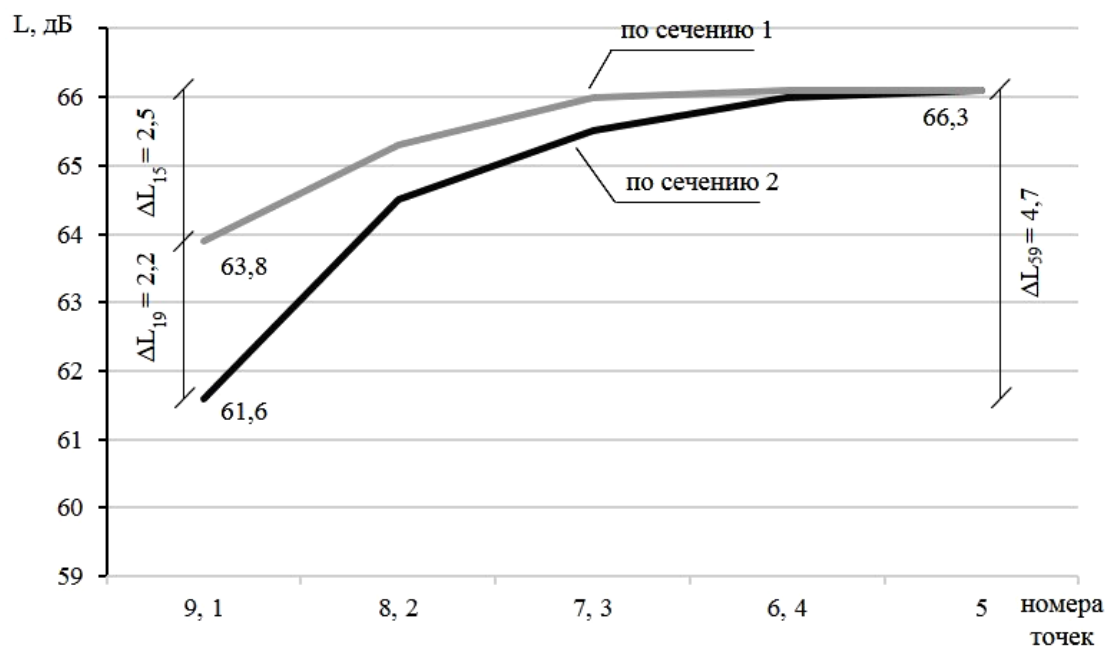
При усреднении в (9) используется скорректированное значение

$$M = M_0 - \frac{q}{NK_{\text{од}}},\tag{5}$$

учитывающее уменьшение  $M_0$  за счет исключения из накопления результатов  $g$  случаев расположения источников шума, слишком близко приблизившихся к расчетной точке.

Для получения достоверной статистически обоснованной выборки количество расстановок или фиксации речи пассажиров  $M_0$  должно быть достаточно велико. Однако уже при  $M_0 = 20$  вариантах фиксации прямого звука рассчитанные уровни мало отличаются от конечных. Расчеты показали, что снижение  $M_0$  с 10 000 до 1000 приводит к изменению в значениях уровней в расчетных точках не более  $\Delta L = \pm 0,02$  дБ, а при изменении  $M_0$  от 1000 до 100 перепад в уровнях составляет  $\Delta L = \pm 0,2$  дБ.

Результаты расчета уровней прямого звука показаны на рис. 2. На этом же графике показаны перепады уровней для характерных расчетных точек,  $\Delta L_{19} = 2,2$  дБ,  $\Delta L_{15} = 2,5$  дБ и  $\Delta L_{59} = 4,7$  дБ. Наличие перепадов уровней вызвано ограничением прихода звуковой энергии в расчетную точку, например, в угол помещения.



**Рис. 2. Графики рассчитанных уровней давления прямого звука**  
(положение линий 1 и 2 показано на рис. 1)

Предложенный метод расчета прямого звука позволяет оценить шумовой режим помещений с большим скоплением людей и разработать мероприятия по снижению шума, к которым, например, может относиться изменение количества одновременно находящихся в здании людей. Также данная методика расчета обеспечивает возможность последующего нахождения отраженной составляющей звуковой энергии и, следовательно, определять общий фоновый шум в помещениях с большим количеством людей.

#### *Список использованных источников*

1. Железняк, В. К. Некоторые методические подходы к оценке эффективности защиты речевой информации / В. К. Железняк, Ю. К. Макаров, А. А. Хорев // Специальная техника. – 2000. – № 4. – С. 39 – 45.
2. Макриненко, Л. И. Акустика помещений общественных зданий. – М. : Стройиздат. Редакция литературы по строительным материалам и конструкциям, 1986. – 173 с.

#### *References*

1. Zheleznyak, V. K. Some methodological approaches to evaluating the effectiveness of information security speech / V. K. Zheleznyak, Yu. K. Makarov, A. A. Horev // Spetsialnaya tehnika. – 2000. – N 4. – P. 39 – 45. (In Russian)
2. Makrinenko, L. I. Acoustics of Public Buildings // Moskva: Stroyizdat. Revision of the literature on building materials and structures, 1986. – 173 p.

УДК 66.063.8  
ББК К34.42

**Карпушкин С. В., Семилетов А. В., Коняхин А. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЕМКОСТИ**

**Karpushkin S. V., Semiletov A. V., Konjahin A. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**THE USE OF A SYSTEM OF FINITE-ELEMENT ANALYSIS TO SIMULATE  
THE THERMAL AND HYDRODYNAMIC PROCESSES IN A VERTICAL TANK**

*Аннотация.* Представлены результаты моделирования полей температур и скоростей в системе конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation для процесса охлаждения жидкости в промышленном вертикальном емкостном аппарате со встроенным змеевиком и механической мешалкой. Анализ результатов и их сравнение с результатами гидродинамического и теплового расчета аппарата по традиционной методике позволили обосновать вывод о необходимости совмещения процессов механического перемешивания и теплообмена для обеспечения требований технологического регламента.

*Ключевые слова:* емкостное оборудование, гидродинамический и тепловой расчет, поля температур и скоростей, конечно-элементный анализ.

*Abstract.* The results of modeling the temperature and velocity fields in the finite element analysis Solid Works Flow Simulation for cooling process fluid in an industrial vertical capacitive apparatus with integrated coil and rabble. Analysis of these results and their comparison with the results of thermal and hydrodynamic calculation according to the traditional method allowed justifying the conclusion about the necessity of combining the processes of mechanical stirring and heat to meet the requirements of technological regulations.

*Keywords:* capacitive equipment, hydrodynamic and thermal calculation, temperature and velocity fields, finite element analysis.

Вертикальная емкость с перемешивающим и теплообменным устройством – один из наиболее популярных типов основного оборудования технологических систем периодического действия, использование которых характерно для химической и нефтехимической, пищевой и фармацевтической промышленности. Эти аппараты имеют цилиндрическую форму с эллиптическим, коническим или плоским днищем, оснащаются механическими мешалками, теплообменными рубашками и встроенными змеевиками. Проектирование и реконструкция вертикальных емкостей осуществляются на основе результатов гидродинамического и теплового расчетов, содержание и последовательность которых рекомендованы документом [1].

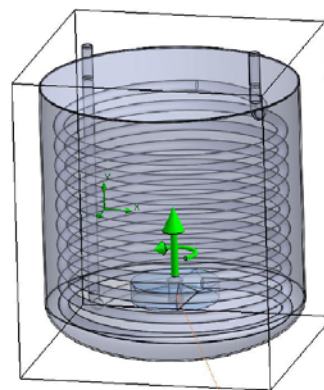
В данной работе обсуждаются результаты моделирования полей температур и скоростей для процесса охлаждения агрессивной жидкости в вертикальном емкостном аппарате с встроенным змеевиком и трехлопастной мешалкой. Моделирование реализовано в системе конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation, ориентированной на процессы движения газов, жидкостей и сопутствующие тепловые процессы. Цель моделирования – сравнение результатов расчетов процессов перемешивания и теплообмена по традиционной методике [1, 2] и с применением системы конечно-элементного анализа. В качестве объекта сравнения выбран реальный промышленный аппарат ОАО «Пигмент», г. Тамбов с характеристиками:

- материал корпуса и змеевика – титан;
- объем аппарата –  $2,8 \text{ м}^3$ ;
- внутренний диаметр аппарата –  $1,5 \text{ м}$ ;
- высота аппарата –  $1,6 \text{ м}$ ;
- толщина стенки аппарата –  $0,01 \text{ м}$ ;
- мешалка одна, трехлопастная;
- диаметр мешалки –  $0,4 \text{ м}$ ;
- частота вращения мешалки –  $900 \text{ 1/мин}$  ( $\sim 94 \text{ рад/с}$ );
- диаметр навивки змеевика –  $1,3 \text{ м}$ ;
- диаметр трубы змеевика –  $0,057 \text{ м}$ ;
- толщина стенки трубы змеевика –  $0,003 \text{ м}$ .

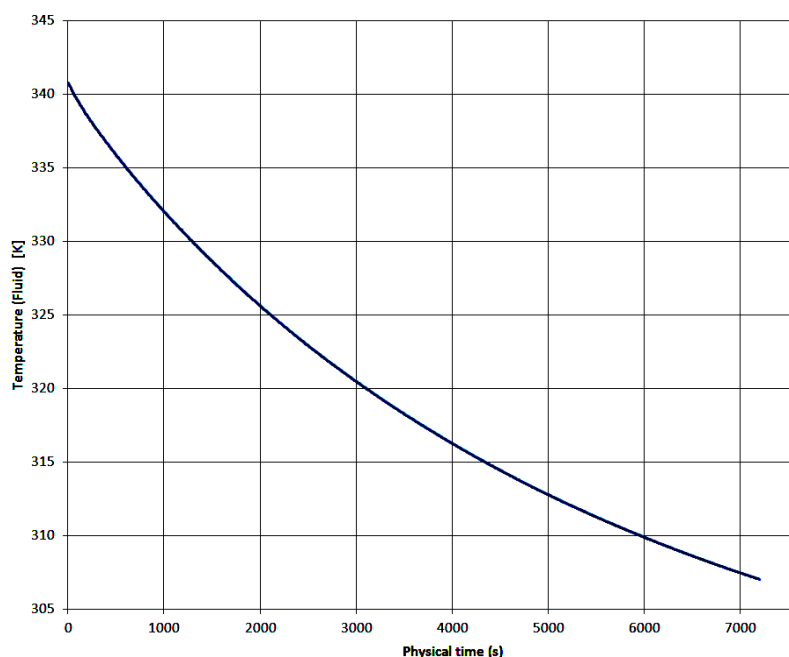
Аппарат используется для охлаждения олеума (25%) от температуры  $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры  $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . В змеевик подается оборотная вода, ее начальная температура  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , конечная –  $26 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Геометрическая модель аппарата представлена на рис. 1.

В системе Solid Works Flow Simulation поля температур и скоростей формируются в пределах указанного интервала времени. Шаг по времени задается пользователем. Объемы жидкостей в змеевике и в аппарате покрываются сетками конечных элементов (КЭ) в форме параллелепипедов, а значения искоемых переменных (температур и скоростей) определяются в центральных точках КЭ. Заметим, что если форма исследуемых элементов аппарата отличается от параллелепипеда, то расчеты производятся только для тех фрагментов КЭ, которые попадают в пределы геометрической модели. При автоматическом формировании сетки КЭ все они имеют одинаковые размеры. Пользователь имеет возможность построить сетки КЭ разных размеров для разных фрагментов области расчетов и таким образом оптимизировать процесс вычислений.

Технологический регламент процесса охлаждения олеума отводит на его реализацию два часа, необходимый тепловой поток –  $51\,640 \text{ Вт}$ . Вначале расчет проводился при остановленной мешалке. С применением традиционной методики установлено, что змеевик способен обеспечить тепловой поток  $52\,600 \text{ Вт}$ , т.е. необходимое значение превышено на 8%. С учетом среднестатистической погрешности расчетов по этой методике ( $\geq 20\%$ ), применимость данного аппарата для реализации процесса в заданных условиях вызывает сомнения.

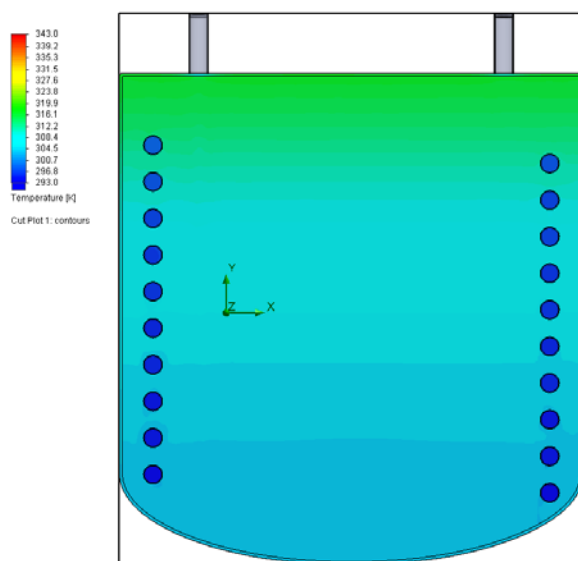


**Рис. 1. Геометрическая модель аппарата**

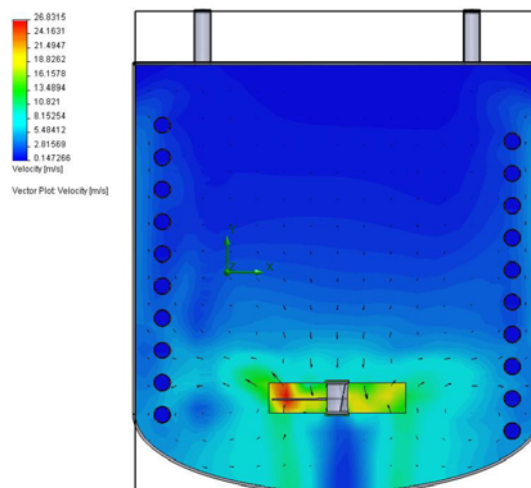


**Рис. 2. График изменения средней температуры жидкости во времени**

На рисунке 2 представлен график изменения средней температуры олеума за регламентное время охлаждения, построенный по результатам моделирования процесса в системе Solid Works Flow Simulation. Как видно, за расчетное время средняя температура олеума понижается до 307 K, т.е. до 34 °С, что соответствует заданной конечной температуре олеума. Однако анализ температурного поля объема жидкости в аппарате через 120 мин после начала охлаждения, см. рис. 3, показывает, что температура олеума на поверхности аппарата превышает 50 °С, а у днища – менее 30 °С, т.е. при использовании для разгрузки аппарата нижнего слива в следующий аппарат вначале поступит олеум более низкой, а затем – более высокой температуры, чем требуется по регламенту. Следовательно, реализация процесса охлаждения олеума без механического перемешивания приводит к нарушению требований технологического регламента.



**Рис. 3. Поле температур в аппарате для расчетного времени 120 мин**



**Рис. 4. Стационарное поле скоростей в аппарате при механическом перемешивании**

Включение привода трехлопастной мешалки потребует дополнительного расхода энергии на перемешивание (1360 Вт), но, несмотря на неравномерность поля скоростей в аппарате, см. рис. 4, обеспечит усреднение температуры олеума и выполнение требований регламента.

Проведение гидродинамического и теплового расчета аппарата по традиционной методике в среде MathCAD, с учетом времени подготовки расчетного файла, превысит 1,5 ч. Продолжительность расчетов температурных полей элементов аппарата при отсутствии механического перемешивания в системе Solid Works Flow Simulation при выбранном шаге по времени 1 мин составили 19,6 мин. В условиях механического перемешивания (и при большей интенсивности процесса теплообмена) пришлось уменьшить расчетный шаг по времени до 0,1 мин, продолжительность расчета увеличилась до 56,8 мин.

Таким образом, применение системы конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation для рассмотренного примера позволило сделать обоснованный вывод о необходимости совмещения процессов механического перемешивания и теплообмена для обеспечения требований технологического регламента.

#### *Список использованных источников*

1. Руководящий нормативный документ. Механические перемешивающие устройства. Метод расчета. РД 26-01-90–85. – Л. : РТП ЛенНИИхиммаша, 1985. – 257 с.
2. Карпушкин, С. В. Расчеты и выбор механических перемешивающих устройств вертикальных емкостных аппаратов : учеб. пособие / С. В. Карпушкин, М. Н. Краснянский, А.Б. Борисенко. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2009. – 168 с.

#### *References*

1. Steering normative document. Mechanical mixers. The method of calculation. RD 26-01-90–85. – Leningrad : RTP LENNIICHIMMASH, 1985. – 257 p.
2. Karpushkin, S.V. Calculations and selection of mechanical mixers vertical capacitive devices : a tutorial / S. V. Karpushkin, M. N. Krasnyanskiy, A. B. Borisenko. – Tambov : Publishing House of the Thumb. state. tehn. Univ. – 2009. – 168 p.

**Карпушкин С. В., Семилетов А. В., Коняхин А. В.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И СКОРОСТЕЙ  
В ТЕПЛООБМЕННИКЕ «ТРУБА-В-ТРУБЕ» С ПРИМЕНЕНИЕМ  
СИСТЕМЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА**

**Karpushkin S. V., Semiletov A. V., Konjahin A. V.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

**MODELING THE TEMPERATURE AND VELOCITY FIELDS  
IN THE HEAT EXCHANGER “TUBE-IN-TUBE” USING THE SYSTEM  
OF FINITE ELEMENT ANALYSIS**

*Аннотация.* Представлены результаты моделирования полей температур и скоростей в системе конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation для процесса охлаждения жидкости в теплообменнике типа «труба-в-трубе». Анализ этих результатов и их сравнение с результатами расчета аппарата по традиционной методике показали преимущества применения системы Solid Works Flow Simulation и позволили сделать вывод о непригодности выбранного аппарата для реализации указанного процесса и необходимости изменения режима его функционирования.

*Ключевые слова:* теплообменник «труба-в-трубе», тепловой и гидродинамический расчет, поля температур и скоростей, конечно-элементный анализ.

*Abstract.* The results of modeling the temperature and velocity fields in the finite element analysis Solid Works Flow Simulation for cooling fluid in heat exchanger “tube-in-tube”. Analysis of these results and their comparison with the results of apparatus calculation according to the traditional method showed the advantages of the use Solid Works Flow Simulation, led to the conclusion about the unsuitability of the selected apparatus to realization of this process, and the need of changing the operating mode.

*Keywords:* heat exchanger “tube-in-tube”, thermal and hydrodynamic calculation, temperature and velocity fields, finite element analysis.

Область промышленного применения теплообменников типа «труба-в-трубе» – реализация процессов нагрева и охлаждения в системах «жидкость–жидкость» при небольших расходах и неизменном агрегатном состоянии теплоносителей. Эти аппараты используются в химической и нефтехимической промышленности для предварительного подогрева или неглубокого охлаждения жидких рабочих сред. Классическая методика теплового расчета теплообменников «труба-в-трубе», см. [1], предусматривает применение критериальных уравнений: расчет теплопередачи ведется для одной условно-усредненной точки теплообменной поверхности. Достоверность результатов таких расчетов невысока, поэтому в практике промышленного проектирования принято увеличивать полученное значение необходимой поверхности теплообмена в 2–3 раза.

Существенное повышение качества проектных решений возможно с применением современных, высокоэффективных и недорогих систем конечно-элементного анализа, которые позволяют за приемлемое время определять поля параметров технических объектов (температур, скоростей, напряжений).

Данная работа посвящена анализу результатов моделирования полей температур и скоростей теплоносителей в теплообменнике «труба-в-трубе», полученных с применением системы конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation и их сравнению с результатами расчетов теплообменника в системе автоматизированных расчетов теплообменного оборудования Heat Exchange [2], которая разработана на основе традиционной методики. Объектом сравнения является промышленный аппарат с характеристиками:

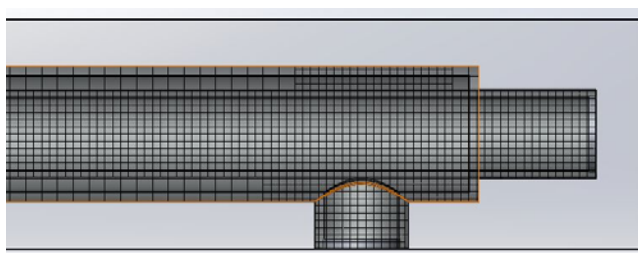
- материал теплообменной трубы – Сталь 10;
- внутренний диаметр теплообменной трубы – 32 мм;
- толщина стенки теплообменной трубы – 2,5 мм;
- внутренний диаметр кожуховой трубы – 50 мм.

В теплообменнике реализуется процесс охлаждения потока горячего метилового спирта (расход  $\sim 1,7$  л/с) от начальной температуры  $70^\circ\text{C}$  до конечной  $40^\circ\text{C}$  оборотной водой с начальной температурой  $30^\circ\text{C}$  и конечной  $35^\circ\text{C}$ . Результаты расчета процесса теплообмена в системе Heat Exchange по традиционной методике: необходимый расход оборотной воды 10 л/с, необходимая поверхность теплообмена  $6,36\text{ м}^2$ , длина теплообменника 58,7 м.

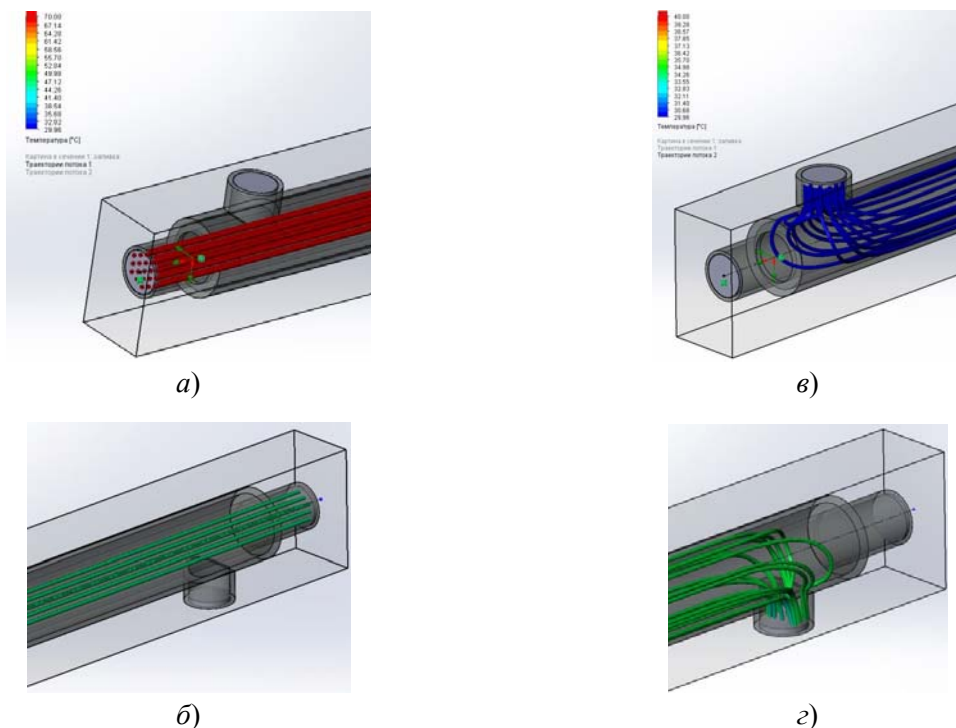
Рисунок 1 иллюстрирует фрагмент геометрической модели теплообменника, сформированной для системы Solid Works Flow Simulation, и сетки конечных элементов (КЭ) для объемов жидкости в кожуховой и теплообменной трубах, причем сетка, автоматически сформированная системой, модифицирована с целью сокращения продолжительности расчетов без потери точности.

Формирование полей скоростей и температур жидкостей в теплообменной и кожуховой трубах, осуществлялось с шагом по времени, определяемым пользователем. На рисунке 2 представлены фрагменты поля температур, на рис. 3 – график изменения средних скоростей жидкостей для двух фрагментов теплообменника длиной 4 м, на рис. 4 – графики изменения средних температур жидкостей в теплообменной и кожуховой трубах.

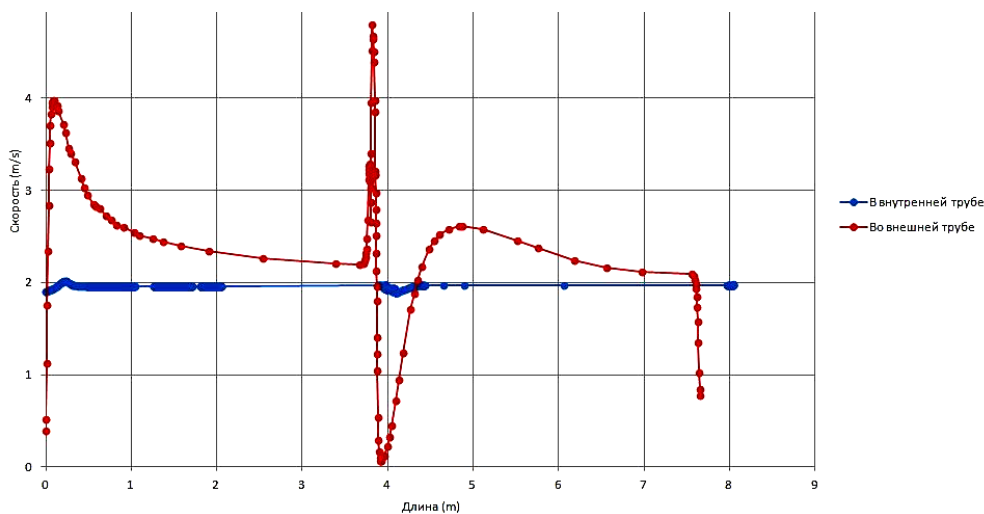
Рисунки 2, б и 4, а показывают, что при установившемся режиме работы теплообменника из кожуховой трубы выходит метиловый спирт со средней температурой  $\sim 47^\circ\text{C}$ , т.е. при заданном его расходе и скорости потока  $\sim 2$  м/с, см. рис. 3, теплообменник данной конструкции не обеспечивает требуемой интенсивности теплопередачи.



**Рис. 1. Фрагмент геометрической модели и сетка КЭ**



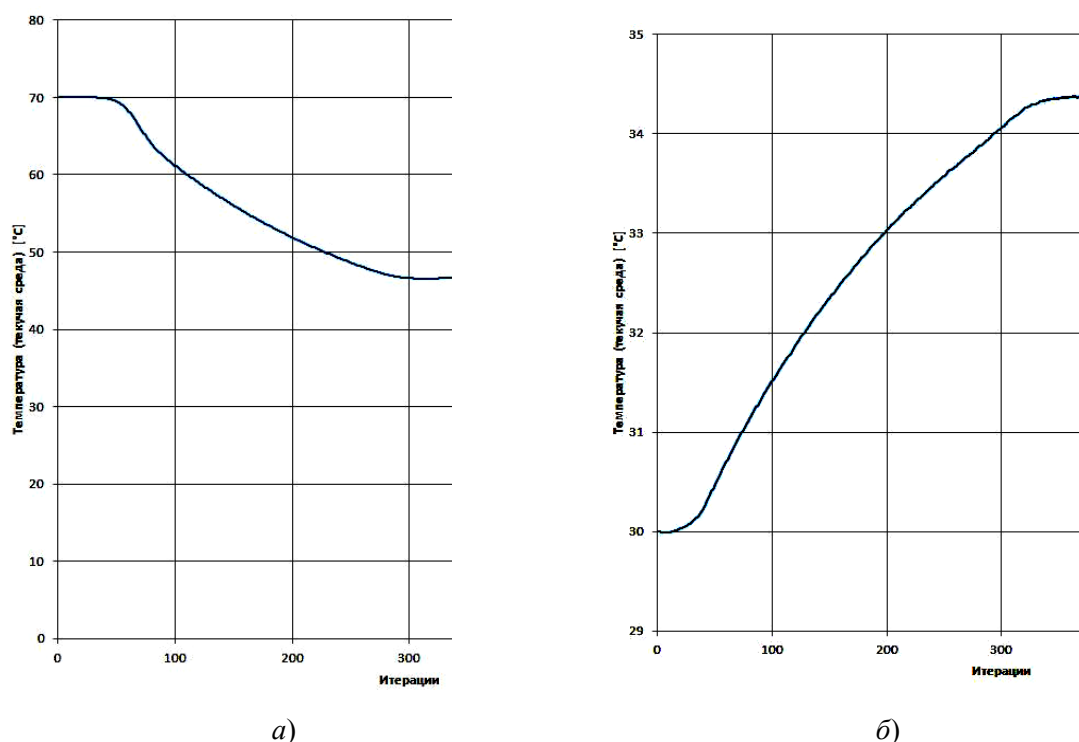
**Рис. 2. Поля температур теплообменной (а, б) и кожуховой труб (в, з) теплообменника «труба-в-трубе»**



**Рис. 3. Средние скорости жидкостей в теплообменнике**

Необходимо уменьшить расход спирта до 1,36 л/с, либо изменить характеристики оборотной воды. Желательно также увеличить диаметр соединительных штуцеров фрагментов кожуховой трубы для уменьшения ее гидросопротивления и разброса скоростей воды в ее сечениях.

Проведение теплового и гидравлического расчета теплообменника по традиционной методике в среде MathCAD с учетом времени подготовки расчетного файла потребовало затрат времени ~1,2 ч. Продолжительность определения полей температур и скоростей жидкости в теплообменной и кожуховой трубах аппарата с применением системы Solid Works Flow Simulation в данном конкретном случае при рабочем шаге по времени 0,5 мин не превысила 44 мин.



**Рис. 4. Графики изменения средней температуры  
в теплообменной (а) и кожной (б) трубе**

Как видно, применение системы конечно-элементного анализа Solid Works Flow Simulation в конкретном рассмотренном случае привело к сокращению продолжительности расчета и позволило сделать обоснованный вывод о непригодности выбранного аппарата для реализации указанного процесса и необходимости изменения режима его функционирования.

#### *Список использованных источников*

1. Романков, П. Г. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов, О. М. Флисюк, М. И. Курочкина. – СПб. : Химия, 1998. – 496 с.
2. Свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010610036. Система автоматизированных тепловых расчетов теплообменного оборудования Heat Exchangers Design (Heat Exchange) / Борисенко А. Б., Карпушкин С. В., Малыгин Е. Н. – Правообладатель : ГОУ ВПО Тамбовский ГТУ ; заяв. № 2009615164 от 21.09.2009 ; зарег. в реестре программ для ЭВМ 11.01.2010.

#### *References*

1. Romankov, P. G. Methods for calculating the processes and devices of chemical technology / P. G. Romankov, V. F. Frolov, O. M. Flisyuk, M. I. Kurochkina. – St. Petersburg : Chemistry, 1998. – 496 p.
2. Certificate of official registration of the computer № 2010610036. Automated system thermal calculations of heat exchange equipment Heat Exchangers Design (Heat Exchange) / Borisenko A. B., Karpushkin S. V., Malyigin E. N. – Copyright : GOU VPO Tambov State Technical University ; Application № 2009615164 from 21.09.2009 ; Registered in the Register of the computer programs 11.01.2010.

**Бабичев А. М., Толстых С. Г., Подольский В. Е.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **МЕТОД ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛЕННОМ РЕЖИМЕ**

**Babichev A. M., Tolstyh S. G., Podolskiy V. E.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

## **METHOD OF THE COMPLEXITY EVALUATION OF HIGH PRECISION COMPUTATIONS IN A DISTRIBUTED MODE**

*Аннотация.* В статье рассмотрены методологические аспекты оценки сложности крупноблочных облачных вычислений с повышенной точностью. Предлагается метод улучшения метрик оценки сложности, использующих для этого граф потока управления программ, для построения оптимальных по производительности вычислительных систем, функционирующих в облачной среде.

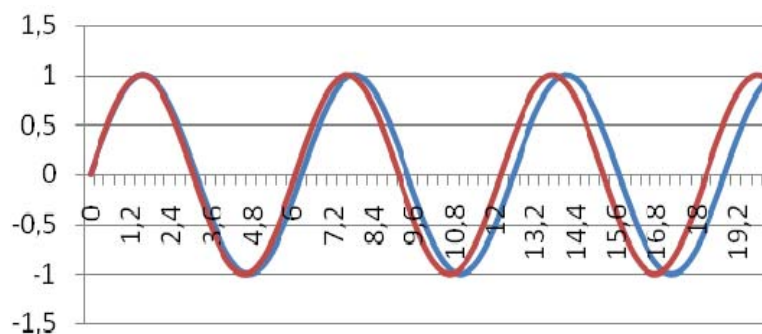
*Ключевые слова:* оценка сложности, параллельные вычисления, высокоточные вычисления.

*Abstract.* The article describes the methodological aspects of the complexity evaluation of large-block cloud computing with enhanced precision. We propose a method for improving the complexity evaluation metrics, which use control flow graph of the program, for designing of optimal performance computing systems that operate in the cloud.

*Keywords:* complexity evaluation, parallel computing, precise computations; precision-trust arithmetics.

Существует множество областей науки и производства, требующих очень высокоточных вычислений. Малейшие неточности в таких отраслях могут привести к крайне негативным последствиям и, зачастую, экономическим потерям и даже вреду человеческому здоровью и экологии. Поэтому в таких вычислениях крайне важно следить за точностью получаемых результатов [1].

При использовании компьютерных расчетов распространено такое явление, как накопление ошибки вычислений. Как правило, оно происходит при циклическом вычислении каких-либо значений, которые основываются на предыдущих. Если такое значение вычисляется с помощью числового типа, содержащего недостаточное количество знаков после запятой, то программа округляет последнее число, что приводит к небольшой, но погрешности. Но когда это значение передается далее по циклу, то погрешности при вычислении следующих значений начинают накладываться друг на друга, и ошибка начинает заметно увеличиваться. Это легко заметить, если сравнить эти вычисления с их теоретическими идеальными значениями (рис. 1).



**Рис. 1. Разница между идеальным графиком и графиком с накопленной ошибкой вычисления**

Для компенсации этого недостатка существуют различные способы но, в основном, они связаны с модернизацией способа округления при использовании чисел с небольшим количеством знаков после запятой, как, например, случайное округление или чередующееся округление.

Однако для высокоточных вычислений такие методы не подходят, так как округление остается неточным методом и в лучшем случае можно только немного уменьшить накопление ошибки. В таких ситуациях необходимо использовать типы чисел, которые позволяют производить операции с числами с очень большим числом знаков после запятой, что позволит либо вообще избавиться от ошибки округления, либо свести ее к минимуму.

Современные компьютеры позволяют производить вычисления с числами, имеющими несколько тысяч знаков после запятой, за достаточно небольшие промежутки времени [2]. Однако, при использовании чисел высокой точности, возникает другая проблема – длительность процесса расчетов. И перед тем, как начинать эти расчеты, важно оценить их ресурсоемкость и время затраты.

Такая оценка описывает целесообразность и возможность исполнения программы на одном компьютере, так как часто время получения результата не вписывается в требуемые сроки. В таком случае используется распараллеливание программы и расчет ее в распределенном режиме на нескольких машинах или в облаке. Такой режим работы программы также должен быть подвергнут оценке, потому что работа в распределенном режиме отличается от расчета на одной машине, работает по другому алгоритму и занимает другое количество времени.

Для измерения характеристик и критериев качества используются метрики измерения сложности программ. Как правило, метрики сложности дают информацию рекомендательного характера и используются для изучения сложности разрабатываемого программного обеспечения (ПО), оценки трудозатрат и объема работ, необходимых для реализации проекта, и также дают представление о возможностях улучшения программного кода или оптимизации усилий, затрачиваемых разработчиком на создание программы.

В данной работе мы используем метрики оценки цикломатической сложности программы, использующих для этого граф потока управления программ (ГПУ) [3]. Однако,

оценка вычислительной сложности с использованием этих метрик может быть неполной, так как эти метрики дают достаточно субъективную оценку программы, многие ориентированы больше на оценку стоимости разработки и стилизованных особенностей программиста, без учета сложности формул, топологии связей и прочих нюансов, которые в действительности оказывают сильное влияние на окончательную вычислительную сложность ПО.

Для оценки сложности и время затрат необходимо уметь оценивать самый базовый элемент программы – формулы уравнений [4]. Для этого мы будем использовать деревья формул. Дерево – это связный ациклический граф. В данной работе нас интересует использование так называемых «двоичных деревьев». Двоичные деревья это такие деревья, из каждого узла которого исходит не более двух подчиненных элементов.

Также предлагается использовать сети Петри в качестве развития метрик оценки сложности распределенного облачного ПО, использующих для этого графы потока управления программ. ГПУ можно заменить сетями Петри в таких метриках, как метрика оценки цикломатической сложности или граничных значений. Благодаря использованию сетей Петри, можно получить гораздо более точные результаты, с учетом параметризации графов, которые при этом будут более гибкими и компактными.

Модифицированная цикломатическая сложность программы вычисляется на основе сложности ее ГПУ и общей сложности операций. С помощью данной характеристики можно даже без расчета времени определить, за какое ориентировочное время может выполняться программа, но такая оценка зависит от конкретного вычислительного оборудования, поэтому использовать ее представляется возможным только после серии тестовых запусков программ различной сложности на конкретном оборудовании.

Эта оценка времени является приблизительной и просто дополняет модифицированную оценку сложности (хотя иногда может быть достаточно и только ее), а время выполнения программы для получения точного представления можно рассчитывать с помощью полиномов, описывающих среднее время вычисления различных операций, а также производительности исследуемого вычислительного оборудования. Таким образом, предлагается методика улучшения метрик, использующих граф потока управления для более точного определения сложности программ.

#### *Список использованных источников*

1. Толстых, С. С. Оценка сложности крупноблочных облачных вычислений, использующих арифметику повышенной точности / С. С. Толстых, В. Е. Подольский // Тр. ИСП РАН. – 2014. – Т. 26, вып. 5. – С. 29 – 64.
2. Подольский, В. Е. Информатизация и Ноосфера. // Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества», ТГТУ, Тамбов, 6 – 8 июня. – 2013. – Т. 1. – С. 208 – 210.
3. McCabe, T.J. A complexity measure // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1976. – V. SE-2, N 4. – С. 308 – 320.
4. Толстых, С. С. Вычислительная сложность решения систем линейных алгебраических уравнений: этап эксперимента / С. С. Толстых, В. Е. Подольский, А. М. Бабичев, С. Г. Толстых // Вестник научных конференций. – 2015. – № 1-7(1). – С. 42 – 51.

### *References*

1. Tolstyh, S. S. Complexity evaluation of the large-block cloud computing, using extended precision arithmetic / S. S. Tolstyh, V. E. Podolskiy // ISPRAS Proceedings. – 2014. – V. 26, N 5. – P. 29 – 64.
2. Podolskiy, V. E. Informatization and noosphere // Proceedings of the International scientific-practical conference “Science and education for sustainable development of the economy, nature and society”. TSTU, Tambov, June 6 – 8. – 2013. – V. 1. – P. 208 – 210.
3. McCabe, T.J. A complexity measure // IEEE Transactions on Software Engineering. – 1976. – V. SE-2, N 4. – C. 308 – 320.
4. Tolstyh, S. S. The computational complexity of solving systems of linear algebraic equations: stage of the experiment / S. S. Tolstyh, V. E. Podolskiy, A. M. Babichev, S. G. Tolstyh // The Bulletin of scientific conferences. – 2015. – N 1-7(1). – P. 42 – 51.

Горшкова Т. С., Елагин М. С., Орешкин А. С.  
Тамбовский государственный технический университет (Россия, г. Тамбов)

## ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДНИЩ ЕМКОСТНЫХ АППАРАТОВ\*

Gorshkova T. S., Elagin M. S., Oreshkin A. S.  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### INFORMATION MODEL BOTTOMS CAPACITIVE DEVICES

*Аннотация.* Описана информационная модель днищ емкостных аппаратов. Модель используется для создания интеллектуальной системы автоматизированного проектирования.

*Ключевые слова:* емкостные аппараты, днища, информационная модель.

*Abstract.* Described information model bottoms capacitive devices. The model is used to create intelligent CAD systems.

*Keywords:* capacitive devices, the bottom, the information model.

Создание новых и модернизация существующих предприятий химической, нефте-химической и пищевой промышленности требует проектирования и изготовления соответствующего технологического оборудования. Одним из наиболее часто используемых видов технологического оборудования являются емкостные аппараты, основным элементов которых являются днища и крышки.

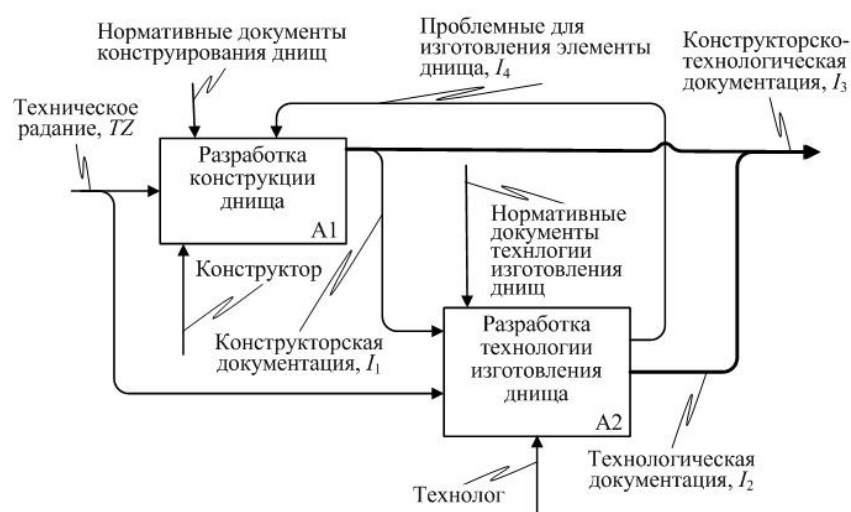


Рис. 1. Функциональная диаграмма разработки конструкторско-технологической документации днищ

\* Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.

Функциональная диаграмма разработки конструкторско-технологической документации днищ в формате IDEF0 представлена на рис. 1 [1, 2].

Для разработки системы автоматизированного проектирования днищ необходима информационная модель, которая должна позволить по данным технического задания, получить конструкторско-технологическую документацию с минимальным участием человека. Эта модель состоит из двух частей, информационной модели конструкции и информационной модели технологии [3 – 6].

Информационная модель конструкции представляется кортежем

$$M = \langle E, M^S, M^P, M^R \rangle,$$

где  $E = \{e_i, i = 1 \dots I\}$  – множество элементов днища (патрубки, фланцы, строповочные устройства);  $M^S$  – модель типа и структуры днища;  $M^P$  – модель параметров элементов;  $M^R$  – модель позиционирования элементов в пространстве.

Модель типа и структуры днища,  $M^S$  представлена продукционными знаниями (правилами), позволяющими выбрать тип днища и его элементы по данным технического задания. Ниже представлены примеры правил.

*Правило 1.* Если вертикальное исполнение аппарата и обечайка цилиндрическая и рабочее давление больше 0,07 МПа и диаметр днища больше 800 мм, то днище эллиптическое отбортованное.

*Правило 2.* Если температура среды в аппарате больше минус 70 °С и меньше плюс 300°С и условное давление меньше 0,25 МПа и условный диаметр меньше 500 мм, то штуцер с фланцем стальным плоским приварным с соединительным выступом по ОСТ 26-1404–76.

Модель позиционирования,  $M^R$  содержит условия сопряжение элементов, которые позволяют собрать их в сборочную единицу. Например, модель позиционирования крышки и фланца (рис. 2), представляется в виде:

$$e1.Dv1 = e5.Dv5,$$

$$e1.Os1 \odot e5.Os5,$$

$$e1.Gr1 \in e5.Gr5,$$

где  $e1$  – крышка;  $e5$  – фланец; знаки  $=$ ,  $\odot$ ,  $\in$  обозначают равенство, соосность и принадлежность.

Представленная модель используется авторами при разработке системы автоматизированного проектирования технологического оборудования [7].

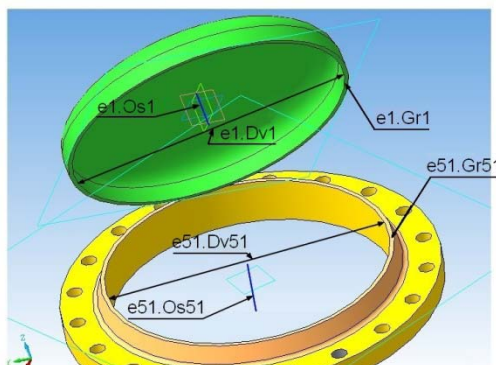


Рис. 2. Сопряжение крышки и фланца

### *Список использованных источников*

1. Мокрозуб, В. Г. Функциональная и процедурная модели проектирования технологического оборудования // Программные системы и вычислительные методы. – 2014. – № 4. – С. 418 – 430.
2. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуальные информационные системы автоматизированного конструирования технологического оборудования : монография. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 128 с.
3. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуализация механических расчетов в виртуальном кабинете «Конструирование технологического оборудования» // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 2. – С. 34 – 40.
4. Мокрозуб, В. Г. Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах. – М. : Издательский дом «Спектр». 2011. – 108 с.
5. Мокрозуб, В. Г. Применение n-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.
6. Мокрозуб, В. Г. Применение гиперграфов и реляционной базы данных для описания структуры радиотехнических / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, С. В. Морозов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 11. – С. 37 – 41.
7. Мокрозуб, В. Г. Создание виртуального кабинета «Конструирование технологического оборудования» в Тамбовском государственном техническом университете // САПР и графика. – 2015. – № 1(219). – С. 38–39.

### *References*

1. Mokrozub, V. G. Functional and procedural model of process equipment // Software systems and computational methods. – 2014. – N 4. – P. 418 – 430.
2. Mokrozub, V. G. Intelligent information systems computer-aided engineering process equipment: monograph. – Tambov : Publishing House TSU. GR Derzhavin. – 2011. – 128 p.
3. Mokrozub, V. G. Intellectualization mechanical calculations in the virtual office «Designing technological equipment» // Industrial ACS and controllers. – 2014. – N 2. – P. 34 – 40.
4. Mokrozub, V. G. Graph structure and relational databases in automated intelligent information systems. – M. : «Spectrum» Publishing House, 2011. – 108 p.
5. Mokrozub, V. G. The use of n-oriented hypergraphs and relational databases for structural and parametric synthesis of technical systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. S. Mordvin, A. A. Ilyasov // Applied Informatics. – 2010. – N 4(28). – P. 115 – 122.
6. Mokrozub, V. G. Application of hypergraphs and relational database to describe radio structure / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov, S. V. Morozov // Successes of modern radio electronics. – 2009. – N 11. – P. 37 – 41.
7. Mokrozub, V. G. Creating a virtual office «Designing technological equipment» in Tambov State Technical University // CAD and Graphics. – 2015. – N 1(219). – P. 38–39.

Горшкова Т. С., Мокрозуб А. В., Храмцова Н. В.  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## ПРОЦЕДУРНАЯ МОДЕЛЬ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДНИЩ ЕМКОСТНЫХ АППАРАТОВ\*

Gorshkova T. S., Mokrozub A. V., Hramtsova N. V.  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### THE PROCEDURAL MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY BOTTOMS CAPACITIVE DEVICES

*Аннотация.* Представлена процедурная модель разработки технологической документации изготовления днищ на основании конструкторской документации.

*Ключевые слова:* автоматизированное проектирование, емкостные аппараты, процедурная модель.

*Abstract.* Presented procedural model for the development of technical documentation manufacture of the heads on the basis of design documentation.

*Keywords:* computer-aided design, capacitive devices, procedural model.

Емкостные аппараты широко применяются в перерабатывающих отраслях промышленности. Одним из основных и наиболее трудоемких элементов этих аппаратов являются днища.

Функциональная диаграмма разработки технологической документации изготовления днищ в формате IDEF0 представлена на рис. 1 [1, 2].

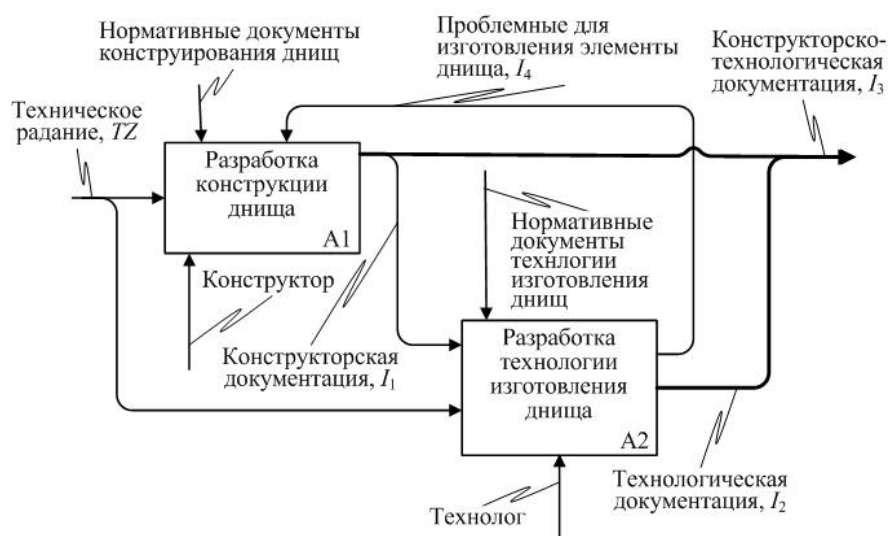


Рис. 1. Функциональная диаграмма разработки технологии изготовления днищ

\* Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.

На основании функциональной диаграммы составлена процедурная модель разработки технологии изготовления днища  $FM$ , с помощью которой информационный поток, определенный конструкторской документацией  $KD$ , с использованием информационной модели  $M$  технологии изготовления днища [3 – 6] преобразуется в информационный поток технологической документации  $TD$ .

На основании функциональной диаграммы составлена процедурная модель разработки технологии изготовления днища  $FM$ , с помощью которой информационный поток, определенный конструкторской документацией  $KD$ , с использованием информационной модели  $M$  технологии изготовления днища [3 – 6] преобразуется в информационный поток технологической документации  $TD$ .

$$FM : IM \xrightarrow{M} TD.$$

$$TD = I_1 \cup I_2 \cup I_3,$$

где  $I_1$  – тип заготовки;  $I_2$  – раскрой заготовки;  $I_3$  – маршрутная карта изготовления днища.

На основании функциональной диаграммы процедурную модель  $FM$  и информационную модель  $M$  представим в виде:

$$FM = \langle F_1, F_2, F_3 \rangle,$$

$$M = \langle M_1, M_2, M_3 \rangle,$$

где  $F_1$  – процедура выбора заготовки;  $F_2$  – процедура раскроя заготовки;  $F_3$  – процедура разработки маршрутных карт;  $M_1$  – информационная модель выбора заготовки;  $M_2$  – информационная модель раскроя заготовки;  $M_3$  – информационная модель составления маршрута изготовления днища.

В свою очередь  $F_1, F_2, F_3$  можно представить в виде:

$$F_1 : IM \xrightarrow{M_1} I_1,$$

$$F_2 : IM \cup I_1 \xrightarrow{M_2} I_2,$$

$$F_3 : IM \cup I_2 \xrightarrow{M_3} I_3.$$

Структуру информационных моделей рассмотрим на примере информационной модели задания маршрута обработки  $M_2$ .

Информационная модель в соответствии с ИСО 10303–1: 1994 определяется как, «формальная модель ограниченного набора фактов, понятий или инструкций, предназначенная для удовлетворения конкретному требованию». В соответствии с этим определением информационную модель задания маршрута обработки  $M_2$  представим следующим кортежем

$$M_2 = \langle S, O, P \rangle,$$

где  $S$  – множество свойств и характеристик днища;  $O$  – множество возможных операций изготовления днищ;  $P$  – правила, связывающие свойства и характеристики днищ колес с операциями их изготовления.

### **Примеры правил.**

*Правило 1.* Если параметр материал изготовления = легированная сталь и термообработка днища = есть и полировка днища = есть, то пескоструйная обработка = есть.

*Правило 2.* Если толщина днища > 24мм, то разделка кромки = есть.

*Правило 3.* Если диаметр днища < 1200, штамповка = есть.

Аналогично определяется структура информационных модели выбора заготовки.

База знаний создается авторами в среде MS SQL SERVER. В качестве математического обеспечения для описания базы знаний приняты *n*-ориентированные гиперграфы с ограничениями [7 – 9].

### *Список использованных источников*

1. Мокрозуб, В. Г. Применение гиперграфов и реляционной базы данных для описания структуры радиотехнических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, С. В. Морозов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 11. – С 37 – 41.

2. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.

3. Мокрозуб, В. Г. Автоматизированная информационная система подготовки производства машиностроительного предприятия / В. Г. Мокрозуб, А. Н. Поляков, А. И. Сердюк, К. В. Марусич, М. В. Овечкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 598 – 603.

4. Мокрозуб, В. Г. Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 108 с.

5. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуальные информационные системы автоматизированного конструирования технологического оборудования // Тамбов: Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина. – 2011. – 128 с.

6. Мокрозуб, В. Г. Представление модели параметрического синтеза технического объекта в реляционной базе данных / В. Г. Мокрозуб, А. И. Сердюк, С. Ю. Шамаев, С. В. Каменев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 462 – 466.

7. Мокрозуб, В. Г. Применение *n*-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.

8. Мокрозуб, В. Г. Структура информационно-логической модели кожухотрубчатых теплообменников / В. Г. Мокрозуб, С. В. Морозов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 518 – 526.

9. Мокрозуб, В. Г. Представление ориентированных ультра- и гиперграфов с ограничениями в реляционной базе данных // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2011. – № 3. – С. 17 – 24.

### *References*

1. Mokrozub, V. G. Application of hypergraphs and relational database to describe the structure of radio systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov, S. V. Morozov // *Successes of modern electronics*. – 2009. – N 11. – P. 37 – 41.
2. Mokrozub, V. G. Information and logical models of technical objects and their representation in information systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov // *Information technologies in designing and manufacturing*. – 2010. – N 3. – P. 68 – 73.
3. Mokrozub, V. G. AIS pre-production engineering enterprise / V. G. Mokrozub, A. N. Polyakov, A. I. Serdyukov, K. V. Marusich, M. V. Ovechkin // *Vestnik Tambov State technical University*. – 2012. – V. 18, N 3. – P. 598 – 603.
4. Mokrozub, V. G. Graph structure and relational databases in automated intelligent information systems. – M. : Publishing house Spektr, 2011. – 108 p.
5. Mokrozub, V. G. Intelligent Information Systems CAE process equipment. – Tambov : Publishing House TSU. GR Derzhavin, 2011. – 128 p.
6. Mokrozub, V. G. Representation of parametric synthesis model of a technical object in a relational database / V. G. Mokrozub, A. I. Serdyukov, S. Ya. Shamaev, S. V. Kamenev // *Vestnik Tambov State Technical University*. – 2011. – V. 17, N 2. – P. 462 – 466.
7. Mokrozub, V. G. Application n-oriented hypergraphs and relational databases for structural and parametric synthesis of technical systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. S. Mordvin, A. A. Ilyasov // *Applied Informatics*. – 2010. – N 4(28). – P. 115 – 122.
8. Mokrozub, V. G. Structure information and logical model of shell and tube heat exchangers / V. G. Mokrozub, S. V. Morozov // *Vestnik Tambov State Technical University*. – 2013. – V. 19, N 3. – P. 518 – 526.
9. Mokrozub, V. G. Presentation oriented ultra- and hypergraphs with restrictions in a relational database // *Scientific and technical information. Series 2: Information processes and systems*. – 2011. – N 3. – P. 17 – 24.

УДК 66:004  
ББК Н761ю204.4я73

**Егоров С. Я., Бетин Е. А., Егоров С. Ю.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА ОБЪЕМНО-ПЛАНИРОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХА**

**Egorov S. Ya., Betin E. A., Egorov S. Yu.**  
Tambov State Technical University  
Russia, Tambov)

## **THE INFORMATION SYSTEM OF CHOICE OF SPACE-PLANNING MANAGEMENT SOLUTIONS**

*Аннотация:* Рассматриваются вопросы разработки информационной системы выбора объемно-планировочных решений производства в цехах машиностроительных предприятий, основанные на генерации допустимых вариантов размеров цеха и выбора из них лучшего по критерию капитальных затрат.

*Ключевые слова:* информационная система, объемно-планировочные решения, размещение оборудования.

*Abstract:* Issues of development of information system of choice of space-planning solutions in the production departments of engineering enterprises, based on generate valid options workshop sizes and selecting the best criterion for capital expenditures are considered.

*Keywords:* information system, space-planning decisions, placement of equipment.

В промышленности, при проектировании нового производства или реконструкции существующего возникает необходимость определения минимальной площади, занимаемой технологическим оборудованием, на этапе его компоновки. Разработка информационной подсистемы для оценки площади необходимой для размещения производственного оборудования в цехе позволит проектировщику просматривать различные варианты размещения оборудования и выбрать один оптимальный по ряду показателей [1, 2].

Анализ процессов, номенклатуры применяемого оборудования, а также принципов его расположения показывает [3], что в машиностроительных цехах существуют типовые схемы расположения единиц оборудования, которые объединяются в так называемые типовые варианты компоновки оборудования (однорядное размещение, многорядное, групповое) [4].

Использование этого принципа в планировке позволяет разрабатывать на основе определенного типового размещения пространственные структуры, которые пригодны для компоновки технологической системы любой сложности.

На рисунке 1 показан фрагмент программного цикла, выполненного в среде MathCad, который позволяет определить значение коэффициента  $k$  (коэффициента занимаемой площади цеха ТО ХТС), в зависимости от способа типового размещения, и количества однотипного оборудования с постоянным диаметром аппаратов ХТС.

$$\begin{aligned}
 k(n, nr) := & \left\{ \begin{array}{l} k2 \leftarrow 1.2 \\ k1 \leftarrow 0.8 \\ d \leftarrow 6 \\ So \leftarrow \left[ \text{ceil}\left(\frac{n}{nr}\right) \cdot d + \left( \text{ceil}\left(\frac{n}{nr}\right) - 1 \right) \cdot k2 + 2 \cdot k1 \right] \cdot [nr \cdot d + (nr - 1) \cdot k2 + 2 \cdot k1] \\ Sa \leftarrow n \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \\ K \leftarrow \frac{So - Sa}{So} \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

**Рис. 1. Определение значений коэффициента  $k$ , в зависимости от способа типового размещения, количества однотипного оборудования с постоянным диаметром аппаратов**

В качестве примера использовалась возможность размещения 20 единиц однотипного оборудования в 1, 2, 3 и 4 ряда.

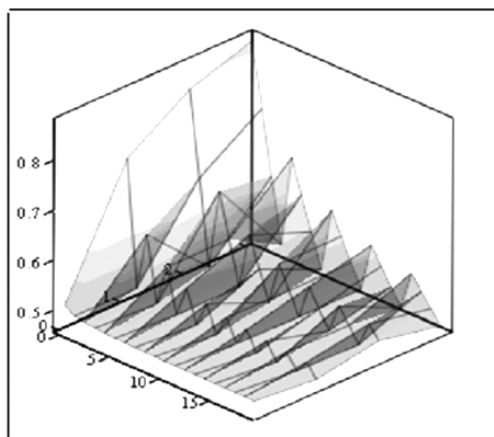
На рисунках 2 и 3 представлен результат работы цикла, получены значения коэффициента  $k$ , в зависимости от того или иного способа типового размещения оборудования ХТС.

Проанализировав поверхность и значения коэффициента  $k$ , можно сделать вывод о том или ином наилучшем варианте типового размещения оборудования ХТС, и как следствие возможность оценить площадь цеха, занимаемую данным оборудованием. Результаты исследований реализованы в информационной системе автоматизированного выбора ОПР производства в многоэтажных цехах. Система может осуществлять:

1. Автоматизированный поиск объемно-планировочных решений в многоэтажном цехе.
2. Сохранение полученных результатов в текстовый файл.
3. Вывод на печать полученных результатов.

Схема работы системы представлена на рис. 4.

Главное окно и панели программы представлены на рис. 5.



**Рис. 2. Поверхность значений коэффициента  $k$**

|    | 1     | 2     | 3     | 4    |
|----|-------|-------|-------|------|
| 1  | 0.51  | 0.749 | 0.831 | 0.87 |
| 2  | 0.497 | 0.497 | 0.662 | 0.74 |
| 3  | 0.493 | 0.613 | 0.493 | 0.61 |
| 4  | 0.49  | 0.484 | 0.653 | 0.4  |
| 5  | 0.489 | 0.566 | 0.566 | 0.67 |
| 6  | 0.488 | 0.479 | 0.479 | 0.60 |
| 7  | 0.487 | 0.542 | 0.591 | 0.54 |
| 8  | 0.487 | 0.477 | 0.533 | 0.47 |
| 9  | 0.486 | 0.528 | 0.474 | 0.60 |
| 10 | 0.486 | 0.475 | 0.56  | 0.5  |
| 11 | 0.486 | 0.518 | 0.516 | 0.51 |
| 12 | 0.486 | 0.474 | 0.472 | 0.47 |
| 13 | 0.485 | 0.511 | 0.541 | 0.56 |
| 14 | 0.485 | 0.474 | 0.506 | 0.53 |
| 15 | 0.485 | 0.506 | 0.47  | 0.50 |
| 16 | 0.485 | 0.473 | 0.528 | 0.46 |
| 17 | 0.485 | 0.502 | 0.499 | 0.54 |
| 18 | 0.485 | 0.473 | 0.469 | 0.52 |
| 19 | 0.485 | 0.499 | 0.519 | 0.49 |
| 20 | 0.485 | 0.472 | 0.494 | 0.46 |

**Рис. 3. Значения коэффициента  $k$**

## Блок формирования исходных данных      Блок формирования ограничений

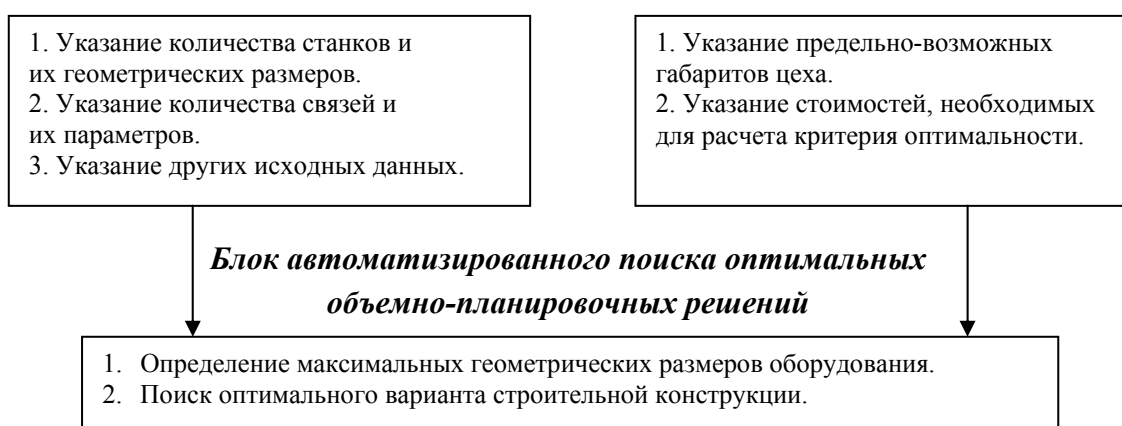


Рис. 4. Схема работы системы

## ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ВЫБОРА ОПР МНОГОЭТАЖНОГО ЦЕХА

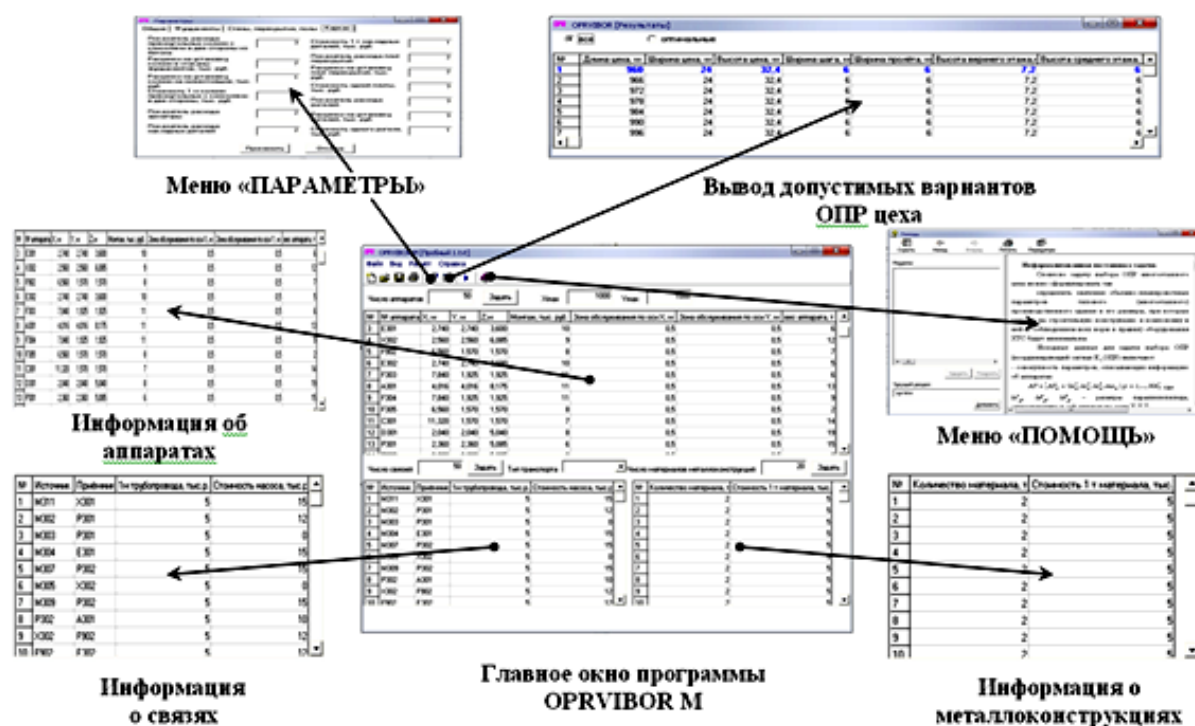


Рис. 5. Главное окно и панели программы

### Список использованных источников

1. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуальные информационные системы автоматизированного конструирования технологического оборудования. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 128 с.
2. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.

3. Егоров, С. Я. Методика расчета нижней оценки стоимости соединений в задачах регулярного размещения промышленных объектов. // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2006. – Т. 12, № 4Б. – С. 1191 – 1199.

4. Егоров, С. Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств. – М., 2007. – 120 с.

#### *References*

1. Mokrozub, V. G. Intelligent Information Systems CAE process equipment. – Tambov : Publishing House TSU. G. R. Derzhavin, 2011. – 128 p.

2. Mokrozub, V. G. Information and logical models of technical objects and their representation in information systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov // Information technologies in designing and manufacturing. – 2010. – N 3. – P. 68 – 73.

3. Egorov, S. Ya. The methodology for calculating the lower valuation of the compounds in the problems of the regular placement of industrial facilities // Herald TSTU. – 2006. – V. 12. –N 4B. – P. 1191 – 1199.

4. Egorov, S. Ya. The analytical and procedural models of layout of industrial production equipment. – М., 2007. – 120 p.

УДК 629.70.058.53  
ББК 32.95

**Игумнов И. С., Данилов С. Н.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**Igumnov I. S., Danilov S. N.**  
Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

### **SYNTHESIS OF FUZZY CONTROL UNMANNED AERIAL REMOTE SENSING DEVICE**

*Аннотация.* В статье рассматриваются ключевые этапы решения задачи управления беспилотным летательным аппаратом на основе методов нечеткой логики. Приведено построение базы нечетких правил, фаззификация и дефаззификация переменных.

*Ключевые слова:* нечеткая логика, дистанционное зондирование, регулятор.

*Abstract.* The article discusses the key steps of solving the problem of unmanned aircraft control based on fuzzy logic methods. Given the construction of fuzzy rule base, fuzzification and defuzzification variables.

*Keywords:* fuzzy logic, remote sensing, controller.

Развитие науки, техники и производства так или иначе приводит к изменению природных систем и загрязнению окружающей среды. В связи с этим важно осуществлять наблюдение, оценку и прогнозирование состояния окружающей среды. Экологический мониторинг включает в себя контроль, как за отдельными компонентами окружающей среды, так и за ее состоянием в целом.

С помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) производят исследование больших труднодоступных территорий доступ, к которым человеку ограничен либо является опасным. В последнее время все большую актуальность приобретают системы управления летательными аппаратами на основе искусственного интеллекта и нечеткой логики.

Опыт исследований показывает, что классические пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы) в задачах управления нелинейными и сложными системами имеют низкие показатели качества. В этом случае улучшение характеристик регуляторов добиваются за счет применения алгоритмов нечеткой логики [1, с. 78].

Для повышения безопасности полетов необходимо улучшать точностные характеристики и помехоустойчивость автоматизированных систем управления летательными аппаратами.

Нечеткое управление (Fuzzy Control) это область теории нечетких множеств и нечеткой логики, применяемое для решения практических задач управления. Нечеткое управление возникло как методология, способная расширить возможности автоматизации в задачах управления, которые могут быть реализованы на основе программируемых микроконтроллеров [2, с. 222–223].

Данный подход в теории управления может быть использован, когда существует определенный опыт экспертов, описанный формальным образом.

Обеспечение автоматизации управления полетом осуществляется через каналы управления двигателем, рулем высоты, элеронами, рулем направления.

Регулятор обеспечивает решение следующих задач:

- стабилизацию БПЛА в прямолинейном горизонтальном полете;
- выполнение разворотов с углами крена до  $60^\circ$ ;
- приведение БПЛА к режиму горизонтального полета из любого положения, если углы крена и тангажа не превышают  $60^\circ$ .

Разработка и применение систем нечетких систем включает в себя ряд этапов:

- формирование базы правил;
- фаззификация входных переменных;
- агрегирование условий нечетких правил;
- дефаззификация, определение выходных переменных.

В качестве входных переменных использовались рассогласование заданной и текущей величины:  $x_1$  – «ошибка регулирования» и производная ошибки – «скорость изменения ошибки регулирования» –  $x_2$ .

Выходная лингвистическая переменная – это «угол поворота элеронов» – у летательного аппарата (ЛА). Составим базу правил с учетом общепринятых обозначений (табл. 1) [3].

### 1. Общепринятые сокращения термов лингвистической переменной

| Обозначение | Англоязычная нотация | Русскоязычная нотация        |
|-------------|----------------------|------------------------------|
| NL          | Negative Large       | Отрицательное большое        |
| NM          | Negative Medium      | Отрицательное среднее        |
| NS          | Negative Small       | Отрицательное малое          |
| ZN          | Zero Negative        | Отрицательное близкое к нулю |
| Z           | Zero                 | Нуль                         |
| ZP          | Zero Positive        | Положительное близкое к нулю |
| PS          | Positive             | Положительное малое          |
| PM          | Positive Medium      | Положительное среднее        |
| PL          | Positive Large       | Положительное большое        |

Таким образом, база правил нечеткого регулятора имеет вид:

ПРАВИЛО\_1: ЕСЛИ « $x_1$  есть PL» И « $x_2$  есть PS» ТО « $y$  есть NL»;  
 ПРАВИЛО\_2: ЕСЛИ « $x_1$  есть PL» И « $x_2$  есть NS» ТО « $y$  есть NS»;  
 ПРАВИЛО\_3: ЕСЛИ « $x_1$  есть PS» И « $x_2$  есть PS» ТО « $y$  есть NM»;  
 ПРАВИЛО\_4: ЕСЛИ « $x_1$  есть PS» И « $x_2$  есть NS» ТО « $y$  есть Z»;  
 ПРАВИЛО\_5: ЕСЛИ « $x_1$  есть NL» И « $x_2$  есть NS» ТО « $y$  есть PL»;  
 ПРАВИЛО\_6: ЕСЛИ « $x_1$  есть NL» И « $x_2$  есть PS» ТО « $y$  есть PS»;  
 ПРАВИЛО\_7: ЕСЛИ « $x_1$  есть NS» И « $x_2$  есть NS» ТО « $y$  есть PM»;  
 ПРАВИЛО\_8: ЕСЛИ « $x_1$  есть NS» И « $x_2$  есть PS» ТО « $y$  есть Z»;  
 ПРАВИЛО\_9: ЕСЛИ « $x_1$  есть PL» И « $x_2$  есть Z» ТО « $y$  есть NM»;  
 ПРАВИЛО\_10: ЕСЛИ « $x_1$  есть PS» И « $x_2$  есть Z» ТО « $y$  есть NS»;  
 ПРАВИЛО\_11: ЕСЛИ « $x_1$  есть NL» И « $x_2$  есть Z» ТО « $y$  есть PM»;  
 ПРАВИЛО\_12: ЕСЛИ « $x_1$  есть NS» И « $x_2$  есть Z» ТО « $y$  есть PS»;  
 ПРАВИЛО\_13: ЕСЛИ « $x_1$  есть Z» И « $x_2$  есть PS» ТО « $y$  есть NS»;  
 ПРАВИЛО\_14: ЕСЛИ « $x_1$  есть Z» И « $x_2$  есть NS» ТО « $y$  есть PS»;  
 ПРАВИЛО\_15: ЕСЛИ « $x_1$  есть Z» И « $x_2$  есть Z» ТО « $y$  есть Z».

Осуществим переход от числовых значений переменных к нечетким, т.е. проведем операцию фаззификации и определим вид функции принадлежности для лингвистических переменных.

Диапазон изменения переменной  $x_1$  – ошибки рассогласования заданной и текущей величины, разбивается на множества (подмножества) NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL, в пределах каждого из которых строится функция принадлежности переменной  $x_1$ . Функции принадлежности имеют треугольную (наиболее распространенную) форму, хотя в общем случае они могут быть любыми, исходя из смысла решаемой задачи. Количество множеств также может быть произвольным.

Рассмотрим пример для  $x_1 = 20$  градусов,  $x_2 = 3$  градуса в минуту.

Для первой лингвистической переменной  $x_1$  используем множество  $A = \{\text{«большая отрицательная», «малая отрицательная», «нулевая», «малая положительная», «большая положительная»}\}$  или  $A = \{NL, NS, Z, PS, PL\}$ . Терм-множество переменной  $x_2$  имеет вид:  $B = \{\text{«отрицательная», «равна нулю», «положительная»}\}$  в символическом виде  $B = \{NS, Z, PS\}$ . Получаем степени принадлежности:  $\mu_A(x_1) = 0,45$  терма PS (рис. 1) и  $\mu_1 B(x_2) = 0,55$  терма Z,  $\mu_2 B(x_2) = 0,08$  терма PS (рис. 2) [4, с. 110].

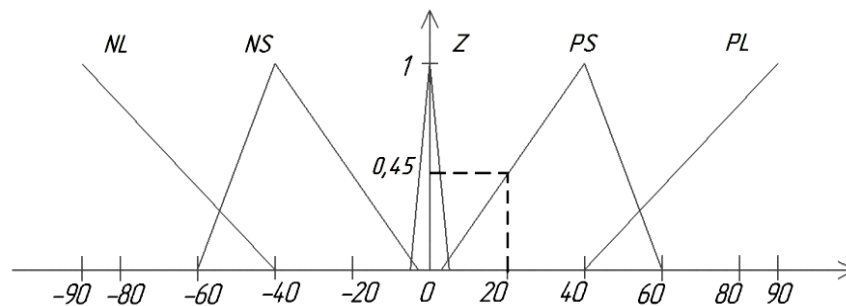
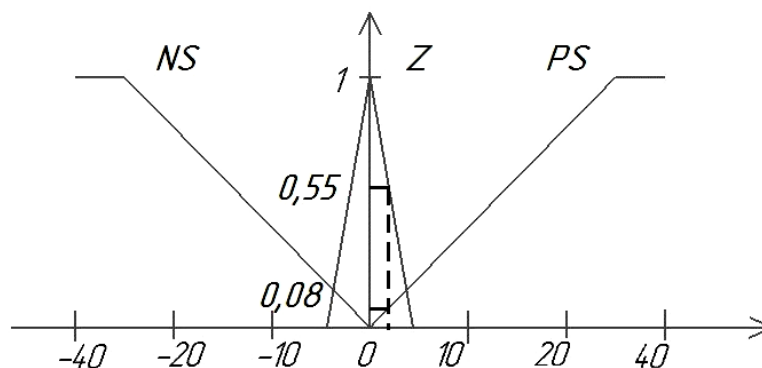


Рис. 1. График функций принадлежности для терма «ошибка регулирования»



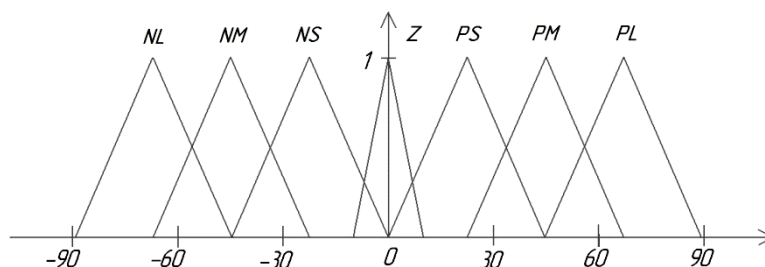
**Рис. 2. График функций принадлежности для терма «скорость изменения ошибки регулирования»**

Полученные подусловия (PS и Z для  $x_1$ , PS для  $x_2$ ) используются в нечетких правилах 3 и 10.

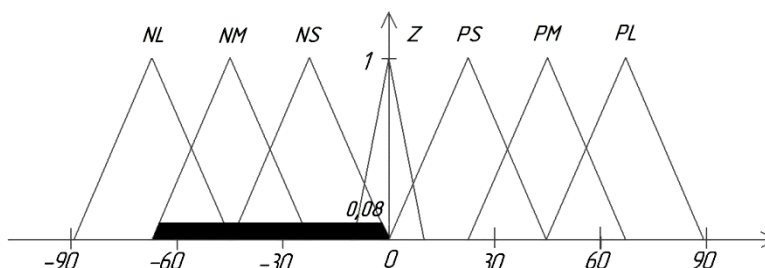
Определим термы для выходной переменной  $y$  «угол поворота элеронов».  $S = \{\text{«очень большой влево»}, \text{«большой влево»}, \text{«небольшой влево»}, \text{«нулевой»}, \text{«небольшой вправо»}, \text{«большой вправо»}, \text{«очень большой вправо»}\}$ . Иначе говоря,  $S = \{NL, NM, NS, Z, PS, PM, PL\}$  (рис. 3).

В качестве метода нечеткого логического вывода был выбран метод Мамдани.

Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий по каждому из правил системы нечеткого вывода [2, с. 191]. Агрегирование условий правила 3 и 10 с помощью операции логической конъюнкции дает число 0,08 (рис. 4).



**Рис. 3. График функций принадлежности для терма «угол поворота элеронов»**



**Рис. 4. График функций принадлежности для терма «угол поворота элеронов» после агрегирования**

Проведем дефаззификацию выходной лингвистической переменной «угол поворота элеронов» методом центра площади:

$$\int_{\min}^y \mu(x) dx = \int_y^{\max} \mu(x) dx ,$$

где  $y$  – результат дефаззификации;  $x$  – переменная соответствующая выходной лингвистической переменной  $y$ ;  $\mu(x)$  – функция принадлежности нечеткого множества.

Иначе говоря, решением будет точка абсциссы, которая делит площадь, ограниченную графиком функции, на две равные части. В результате получаем значение управляющей переменной равное 32 градуса. Это соответствует повороту угла элеронов на значение «большой влево» со средней скоростью.

Таким образом, нечеткая логика имеет ряд достоинств при управлении сложными объектами: обеспечивает наилучшее быстроедействие, высокую устойчивость, минимальное перерегулирование в переходных процессах. Вышеперечисленные достоинства рассматриваемого подхода говорят в пользу применения его в современных методах дистанционного зондирования Земли, в которых требуется точность, оперативная и качественная обработка информации.

#### *Список использованных источников*

1. Денисенко, В. В. ПИД-регуляторы [Электронный ресурс]. Принципы построения и модификации // Современные технологии автоматизации. 2007. – № 1. – С. 78 – 88. – URL : [http://www.rlda.ru/Denisenko\\_PID\\_07.pdf](http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf)
2. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
3. Александров, А. Г. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах / А. Г. Александров, М. В. Паленов. – М. : Автоматика и телемеханика. – 2014. – № 2. – 11 с.
4. Усков, А. А. Системы с нечеткими моделями объектов управления : монография. – Смоленск : СФРУК, 2013. – 153 с.

#### *References*

1. Denisenko, V. V. PID controllers [electronic resource]. Principles of construction and modification // Modern automation technology. – 2007. – N 1. – P. 78 – 88. – URL : [http://www.rlda.ru/Denisenko\\_PID\\_07.pdf](http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf)
2. Leonenkov, A. V. Fuzzy modeling in MATLAB environment and fuzzyTECH. – SPb. : BHV-Petersburg, 2003. – 736 p.
3. Aleksandrov, A. G. Status and prospects of development of adaptive PID control in technical systems / A. G. Aleksandrov, M. V. Palenov. – M. : Automation and Remote Control, 2014 – N 2. – 11 p.
4. Uskov, A. A. Systems with fuzzy models of control objects : Monograph. – Smolensk : SFRUK, 2013. – 153 p.

**Половнева Н. В., Ерохина И. Н., Никонова Н. А.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС\***

**Polovneva N. V., Erokhina, I. N., Nikonova N. A.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **FUNCTIONAL MODEL THE DESIGN TECHNOLOGY OF MANUFACTURING OF GEAR WHEELS**

*Аннотация.* Представлена функциональная диаграмма процесса разработки технологии изготовления зубчатых колес.

*Ключевые слова:* зубчатые колеса, технология изготовления, функциональная диаграмма.

*Abstract.* Presents a functional diagram of the process of development of technology of manufacturing of gear wheels.

*Keywords:* gears, manufacturing techniques, functional diagram.

Зубчатые механизмы часто применяются в технических системах. Качество машин, надежность, экономичность и долговечность в эксплуатации зависит не только от конструкции, но и от технологии производства.

На рисунке 1 представлена функциональная диаграмма [1] процесса разработки технологии изготовления зубчатых колес, лежащая в основе интеллектуальной системы автоматизированного проектирования технологических процессов [2, 3]. Диаграмма отличается наличием базы знаний, которая позволяет принимать решения на разных этапах с минимальным участием технолога.

Знания представлены в виде правил (продукций) вида «Если ..., то ...».

Пример правила определения типа заготовки.

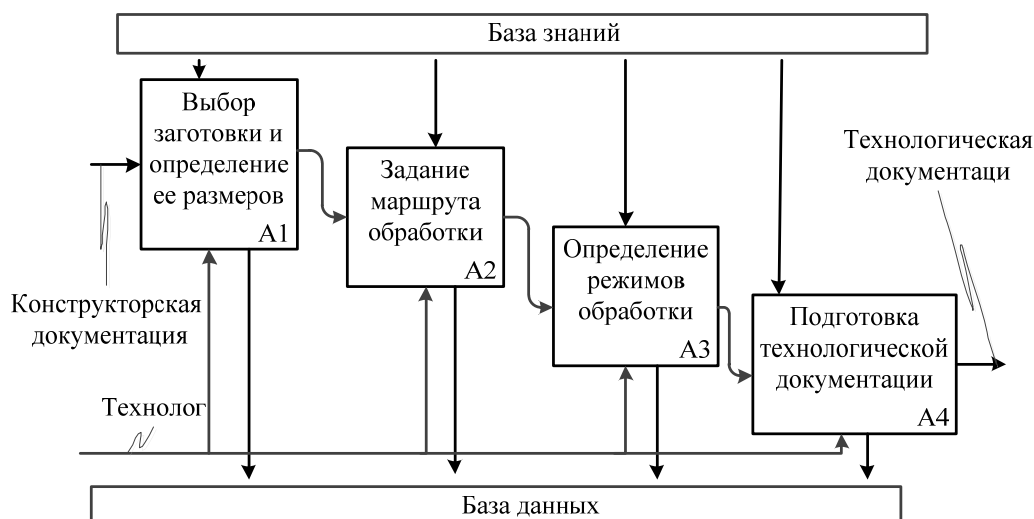
Если тип колеса – вал-шестерня и вид производства – серийное, то тип заготовки – пруток.

Примеры правил определения маршрута обработки.

Первая операция. Если (тип зацепления колеса = внешнее) и (тип венца колеса = открытый или врезной) и (модуль колеса < 5) и (вид термической обработки = улучшение) и (6 <= степень точности колеса <= 7) и (вид производства = серийное или единичное), то операция обработки = черновое зубофрезерование.

---

\* Работа выполнена под руководством проф. каф. КИСМ ТГТУ В. Г. Мокрозуба.



**Рис. 1. Функциональная диаграмма процесса подготовки технологической документации**

Вторая операция. Если (тип зацепления колеса = внешнее) и (тип венца колеса = открытый или врезной) и (модуль колеса < 5) и ( $6 \leq \text{степень точности колеса} \leq 7$ ) и (вид производства = серийное или единичное) и (предыдущая операция = черновое зубофрезерование), то операция обработки = чистовое зубофрезерование.

База знаний создается авторами в среде MSSQLSERVER. В качестве математического обеспечения для описания базы знаний принято *n*-ориентированные гиперграфы с ограничениями [4 – 6].

#### *Список использованных источников*

1. Мокрозуб, В. Г. Функциональная и процедурная модели проектирования технологического оборудования // Программные системы и вычислительные методы. – 2014. – № 4. – С. 418 – 430.
2. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуальные информационные системы автоматизированного конструирования технологического оборудования : монография. – Тамбов : Издательский дом ТГУ им. Г. Р. Державина, 2011. – 128 с.
3. Мокрозуб, В. Г. Интеллектуализация механических расчетов в виртуальном кабинете «Конструирование технологического оборудования» // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2014. – № 2. – С. 34 – 40.
4. Мокрозуб, В. Г. Графовые структуры и реляционные базы данных в автоматизированных интеллектуальных информационных системах. – М. : Издательский дом «Спектр», 2011. – 108 с.
5. Мокрозуб, В. Г. Применение *n*-ориентированных гиперграфов и реляционных баз данных для структурного и параметрического синтеза технических систем / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, А. С. Мордвин, А. А. Илясов // Прикладная информатика. – 2010. – № 4(28). – С. 115 – 122.
6. Мокрозуб, В. Г. Применение гиперграфов и реляционной базы данных для описания структуры радиотехнических / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров, С. В. Морозов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2009. – № 11. – С. 37 – 41.

### *References*

1. Mokrozub, V. G. Functional and procedural model of process equipment // Software systems and computational methods. – 2014. – N 4. – P. 418 – 430.
2. Mokrozub, V. G. Intelligent information systems computer-aided engineering process equipment : monograph. – Tambov : Publishing House TSU. G. R. Derzhavin, 2011. – 128 p.
3. Mokrozub, V. G. Intellectualization mechanical calculations in the virtual office «Designing technological equipment» // Industrial ACS and controllers. – 2014. – N2. – P. 34 – 40.
4. Mokrozub, V. G. Graph structure and relational databases in automated intelligent information systems. – M. : «Spectrum» Publishing House. – 2011. – 108 p.
5. Mokrozub, V. G. The use of n-oriented hypergraphs and relational databases for structural and parametric synthesis of technical systems / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, A. S. Mordvin, A. A. Ilyasov // Applied Informatics. 2010. – N 4(28). – P. 115 – 122.
6. Mokrozub, V. G. Application of hypergraphs and relational database to describe radio structure / V. G. Mokrozub, V. A. Nemtinov, S. Ya. Egorov, S. V. Morozov // Successes of modern radio electronics. – 2009. – N 11. – P. 37 – 41.

**Фролова Т. А., Фролова М. С.**  
Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, г. Тамбов)

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ**

**Frolova T. A., Frolova M. S.**  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov)

### **INFORMATION MODEL OF MEDICAL PRODUCTS BASED ON TECHNOLOGY SET-THEORETIC REPRESENTATION**

*Аннотация.* Разработан алгоритм трансформации информационной модели медицинской техники на основе объектно-ориентированной декомпозиции в информационную модель медицинской техники на основе теоретико-множественного представления.

*Ключевые слова:* медицинская техника, теоретико-множественное представление, информационная модель.

*Abstract.* The algorithm of transformation of the information model of medical equipment on the basis of object-oriented information model to decompose medical equipment on the basis of the set-theoretic representation.

*Keywords:* medical equipment, set-theoretic representation, information model.

Информационные модели и процессы могут быть реализованы на различных платформах, например, на языках информационного моделирования IDEF, EXPRESS, UML и др. [1]. Предпочтительно использовать информационную модель, представленную на таком языке информационного моделирования, который наиболее эффективно способствует решению поставленной задачи. Как отмечал академик В. М. Глушков в 1963 г. в статье «Гносеологическая природа информационного моделирования», информационная модель, записанная на каком угодно языке, естественном или искусственном (например, символическом языке алгебры), должна иметь свойство в соответствии с конкретными правилами преобразования представляться на любом другом языке.

Набор правил преобразования одного вида информационной модели в другой вид представления будем называть **алгоритмом трансформации информационной модели**.

Для математической формулировки и решения многокритериальной задачи выбора оптимальной модели МТ удобно иметь информационную модель МТ на основе теоретико-множественного представления.

Воспользуемся установленной закономерностью, которая характерна для разработанной информационной модели МТ на основе объектно-ориентированной декомпози-

ции. Атрибуты всех классов могут быть только пяти типов: Boolean, Integer, Float, Interval и String.

Основываясь на этой закономерности, все элементы информационной модели МТ на основе теоретико-множественного представления можно сгруппировать на 6 групп, каждая из которых образует отдельное множество:

1-группа: параметры, принимающие логические значения, (тип Boolean). Например, для пакета классов «Ультразвуковой диагностический аппарат», для класса «Область применения УЗИ», для атрибута «Кардиология» имеются два значения – «true» – если эта функция присутствует в приборе, «false»- если эта функция отсутствует;

2-группа: параметры, принимающие целочисленные значения (тип Integer). Например, для пакета классов «Ультразвуковой диагностический аппарат», для класса «Характеристики основного блока», атрибут «Приемно-передающие каналы» может иметь целочисленное значение: 1024;

3-группа: параметры, принимающие вещественные значения (тип Float). Например, для класса «Характеристики основного блока», атрибут «Динамический диапазон, дБ» может иметь вещественное значение: 172 дБ;

4-группа: параметры, которым соответствуют интервальные числа (тип Interval). Например, для класса «Датчики», атрибут «Диапазон частот, МГц» может принимать интервальное значение от 84 до 137 МГц;

5-группа представлена одним параметром, который характеризует стоимость конкретной модели вида МТ (тип Float);

6-группа представлена одним параметром, который определяет название конкретной модели вида МТ (тип String).

Таким образом, необходимо разработать алгоритм трансформации информационной модели МТ на основе объектно-ориентированной декомпозиции в информационную модель на основе теоретико-множественного представления.

Введем следующие обозначения для информационной модели МТ на основе объектно-ориентированной декомпозиции. Пусть  $\omega$  – номер класса,  $\varphi$  – номер атрибута класса. Тогда всего число классов определенного вида МТ равно  $\Omega$ , а число атрибутов класса  $\omega$  равно  $\Phi_\omega$ . Номер класса  $\omega$  и номер атрибута класса  $\varphi$  изменяются соответственно в диапазоне:  $\omega = \overline{1, \Omega}$ ,  $\varphi = \overline{1, \Phi_\omega}$ .

Пусть переменная  $\Gamma_\varphi^\omega$  есть название  $\varphi$ -го атрибута класса  $\omega$  и имеет тип String. Особое отличие имеет переменная  $\Gamma_1^1$ , у которой множество значений есть множество названий всех моделей выбранного вида МТ.

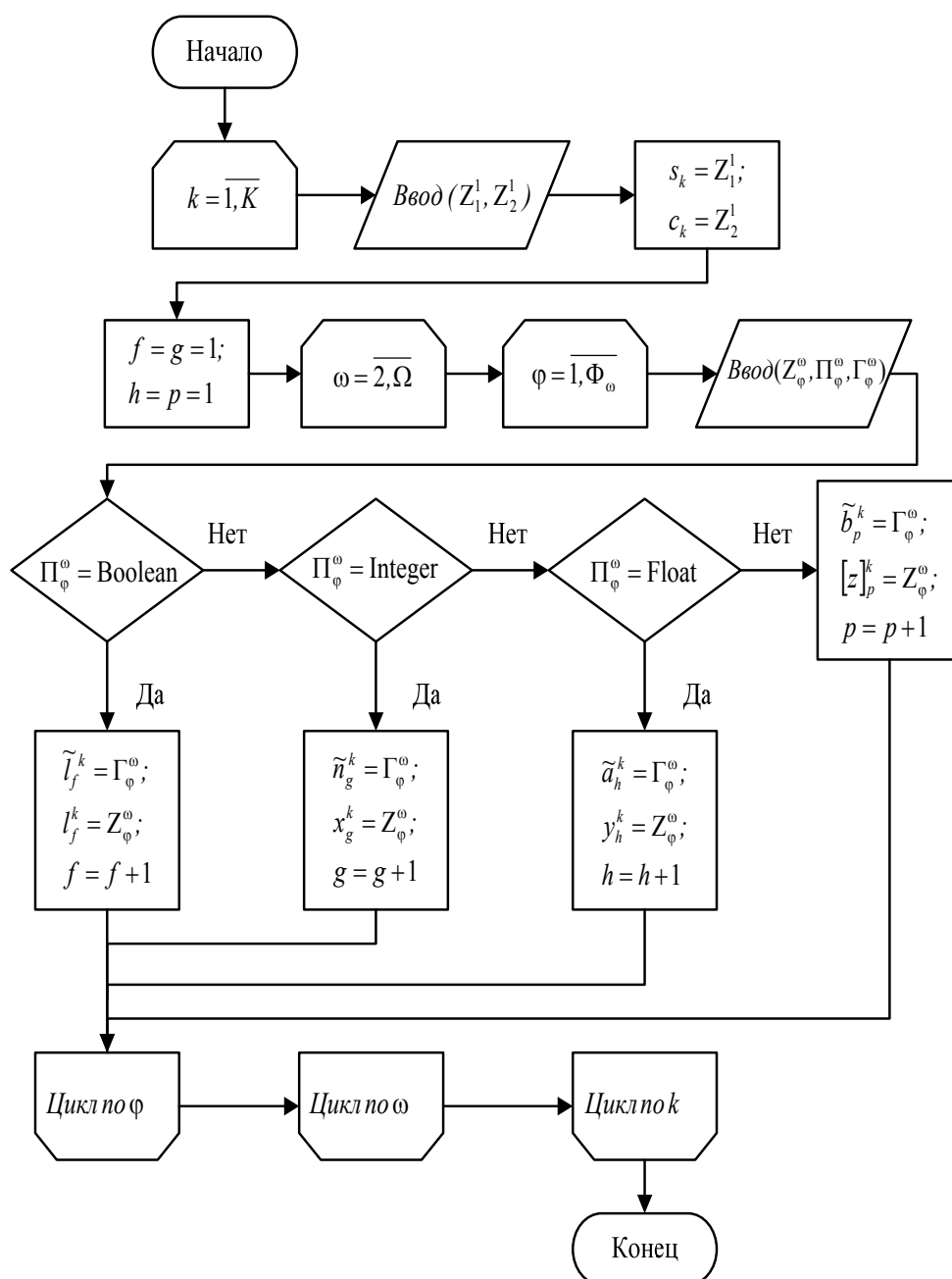
Пусть переменная  $\Pi_\varphi^\omega$  есть название типа  $\varphi$ -го атрибута класса  $\omega$  и имеет тип String, множество значений переменной есть  $\{\text{Boolean, Integer, Float, Interval, String}\}$ .

Пусть переменная  $Z_\varphi^\omega$  есть значение  $\varphi$ -го атрибута класса  $\omega$ .

Для всех  $\Gamma_\varphi^\omega$ ,  $\Pi_\varphi^\omega$ ,  $Z_\varphi^\omega$  индексы изменяются в следующих границах:  $\omega = \overline{1, \Omega}$ ,  $\varphi = \overline{1, \Phi_\omega}$ .

На основе принятых обозначений предложим алгоритм трансформации информационной модели МТ на основе объектно-ориентированной декомпозиции в информационную модель МТ на основе теоретико-множественного представления (рис. 1).

Алгоритм на рис. 1 представляет собой метод построения информационной модели вида МТ, которая включает описание всех  $K$  моделей вида МТ. Считаем, что  $k$  соответствует конкретной модели вида МТ,  $k = \overline{1, K}$ . Здесь  $K$  – число моделей вида МТ. Внешний цикл по  $k$  показывает, что операция трансформации проводится для всех моделей МТ.



**Рис. 1. Алгоритм трансформации информационной модели МТ на основе объектно-ориентированной декомпозиции в информационную модель МТ на основе теоретико-множественного представления**

Для каждой  $k$ -й модели вида МТ вводится значение типа String – название  $k$ -й модели вида МТ и значение типа Float – цена  $k$ -й модели вида МТ, оператор " $Ввод(Z_1^1, Z_2^1)$ ". Переменные  $s_k$  и  $c_k$  – определяют соответственно название и цену  $k$ -й модели вида МТ.

Переменные  $f, g, h, p$  изменяются в диапазоне  $f = \overline{1, F}, g = \overline{1, G}, h = \overline{1, H}, p = \overline{1, P}$ , где  $F, G, H, P$  – число соответственно параметров:

- 1-группы, которые принимают логические значения, (тип Boolean);
- 2-группы, которые принимают целочисленные значения (тип Integer);
- 3-группы, которые принимают вещественные значения (тип Float);
- 4-группы, которым соответствуют интервальные значения (тип Interval).

В основном построение информационной модели МТ на основе теоретико-множественного представления происходит в циклах по  $\omega$  и  $\phi$ . Рассматривается каждый класс  $\omega$  и каждый атрибут  $\phi$  класса в диапазонах:  $\omega = \overline{2, \Omega}, \phi = \overline{1, \Phi_\omega}$ , где  $\Omega$  – число классов,  $\Phi_\omega$  – число атрибутов класса  $\omega$ .

Для  $k$ -й модели вида МТ класса  $\omega$  вводится значение и название атрибута  $\phi$  класса, а также типа атрибута, оператор ввода  $Ввод(Z_\phi^\omega, \Pi_\phi^\omega, \Gamma_\phi^\omega)$ .

Следующий этап – проверка типа атрибута  $\phi$  класса  $\omega$ . Если тип атрибута  $\phi$  есть  $\Pi_\phi^\omega = \text{Boolean}$ , то переменной  $\tilde{l}_f^k$  присваивается имя –  $\Gamma_\phi^\omega$ , переменной  $l_f^k$  значение –  $Z_\phi^\omega$   $\phi$ -го атрибута класса  $\omega$ .

Если тип атрибута  $\phi$  есть  $\Pi_\phi^\omega = \text{Integer}$ , то переменной  $\tilde{n}_g^k$  присваивается имя –  $\Gamma_\phi^\omega$ , переменной  $x_g^k$  значение –  $Z_\phi^\omega$   $\phi$ -го атрибута класса  $\omega$ . Если тип атрибута  $\phi$  есть  $\Pi_\phi^\omega = \text{Float}$ , то переменной  $\tilde{a}_h^k$  присваивается имя –  $\Gamma_\phi^\omega$ , переменной  $y_h^k$  значение –  $Z_\phi^\omega$   $\phi$ -го атрибута класса  $\omega$ . Если тип атрибута  $\phi$  есть  $\Pi_\phi^\omega = \text{Interval}$ , то переменной  $\tilde{b}_p^k$  присваивается имя –  $\Gamma_\phi^\omega$ , переменной  $[z]_p^k$  значение –  $Z_\phi^\omega$   $\phi$ -го атрибута класса  $\omega$ . Такое присвоение значений переменным проводится для каждой  $k$ -й модели вида МТ.

На основании разработанного алгоритма трансформации информационной модели МТ (рис. 1) информационную модель МТ на основе теоретико-множественного представления будем представлять в виде множества:

$$MD_k = \{s_k, L_k, N_k, A_k, B_k, c_k\}, \quad k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

где  $s_k$  – параметр, определяющий название  $k$ -й модели вида МТ;  $L_k$  – множество параметров  $k$ -й модели вида МТ, принимающих логические значения;  $N_k$  – множество параметров  $k$ -й модели вида МТ, принимающих целочисленные значения;  $A_k$  – множе-

ство параметров  $k$ -й модели вида МТ, принимающих вещественные значения;  $B_k$  – множество параметров  $k$ -й модели вида МТ, принимающих интервальные значения;  $c_k$  – вещественный параметр, определяющий стоимость  $k$ -й модели вида МТ. Здесь  $k = \overline{1, K}$ , где  $k$  – номер модели вида МТ,  $K$  – количество моделей вида МТ.

Представим множество  $L_k$  в виде последовательности кортежей:

$$L_k = \{ \langle \tilde{l}_1^k, l_1^k \rangle, \dots, \langle \tilde{l}_f^k, l_f^k \rangle, \dots, \langle \tilde{l}_F^k, l_F^k \rangle \}, \quad (2)$$

где  $\langle \tilde{l}_f^k, l_f^k \rangle$  – кортеж, в котором для  $k$ -й модели вида МТ переменная  $\tilde{l}_f^k$  является именем  $f$ -го параметра и имеет тип String; переменная  $l_f^k$  определяет значение  $f$ -го параметра и принимает логическое значение «true», если параметр  $\tilde{l}_f^k$  присутствует в  $k$ -й модели вида МТ, «false» – если этот параметр отсутствует.

Множество  $N_k$  представляется в виде последовательности кортежей:

$$N_k = \{ \langle \tilde{n}_1^k, x_1^k \rangle, \dots, \langle \tilde{n}_g^k, x_g^k \rangle, \dots, \langle \tilde{n}_G^k, x_G^k \rangle \}, \quad (3)$$

где  $\langle \tilde{n}_g^k, x_g^k \rangle$  – кортеж, в котором для  $k$ -й модели вида МТ переменная  $\tilde{n}_g^k$  является именем  $g$ -го параметра и имеет тип String; переменная  $x_g^k$  принимает целочисленное значение, соответствующее  $g$ -му параметру  $k$ -й модели вида МТ, 2 – группы (множество  $N_k$ ).

Множество  $A_k$  представляется в виде последовательности кортежей:

$$A_k = \{ \langle \tilde{a}_1^k, y_1^k \rangle, \dots, \langle \tilde{a}_h^k, y_h^k \rangle, \dots, \langle \tilde{a}_H^k, y_H^k \rangle \}, \quad (4)$$

где  $\langle \tilde{a}_h^k, y_h^k \rangle$  – кортеж, в котором для  $k$ -й модели вида МТ переменная  $\tilde{a}_h^k$  является именем  $h$ -го параметра и имеет тип String; переменная  $y_h^k$  принимает вещественное значение, соответствующее  $h$ -му параметру  $k$ -й модели вида МТ, 3 – группы (множество  $A_k$ ).

Множество  $B_k$  представляет последовательность кортежей:

$$B_k = \{ \langle \tilde{b}_1^k, [z]_1^k \rangle, \dots, \langle \tilde{b}_p^k, [z]_p^k \rangle, \dots, \langle \tilde{b}_P^k, [z]_P^k \rangle \}, \quad (5)$$

где  $\langle \tilde{b}_p^k, [z]_p^k \rangle$  – кортеж, в котором для  $k$ -й модели вида МТ переменная  $\tilde{b}_p^k$  является именем  $p$ -го параметра и имеет тип String; интервальная переменная  $[z]_p^k$  характеризуется двумя значениями:  $\underline{z}_p^k$  и  $\overline{z}_p^k$ , соответственно целочисленным или вещественным значением нижней границы параметра  $[z]_p^k$ , переменная  $[z]_p^k$  принимает интервальное

значение, соответствующее  $p$ -му параметру  $k$ -й модели вида МТ, 4 – группы (множество  $B_k$ ).

Таким образом, сформировав множество (1) путем присвоения переменным модели конкретных значений, получим информационную модель (1) – (5) вида МТ на основе теоретико-множественного представления.

#### *Список использованных источников*

1. Фролов, С. В. Современные тенденции развития медицинских информационных систем мониторинга / С. В. Фролов, М. А. Лядов, И. А. Комарова, О. А. Остапенко // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2013. – № 2(46). – С. 66 – 75.

#### *References*

1. Frolov, S. V. Modern Trends in Medical Information Systems for Monitoring / S. V. Frolov, M. A. Lyadov, I. A. Komarova, O. A. Ostapenko // Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University. – 2013. – № 2(46). – P. 66 – 75.

**Чернышов В. А.<sup>1</sup>, Семенов А. Е.<sup>1</sup>, Печагин Е. А.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Орловский государственный аграрный университет (Россия, г. Орел),

<sup>2</sup>Тамбовский государственный технический университет (Россия, г. Тамбов)

**СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИМ МОНИТОРИНГ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЛ 6-10 КВ  
ПРИ ПОТЕРЕ РАДИОСВЯЗИ С НАЗЕМНЫМ ПУНКТОМ УПРАВЛЕНИЯ**

**Chernyshov V. A.<sup>1</sup>, Semenov A. E.<sup>1</sup>, Pechagin E. A.<sup>2</sup>**

Orel State Agrarian University (Russia, Orel),

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

**A METHOD FOR CONTROLLING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE,  
MONITOR THE TECHNICAL CONDITION OF 6-10 KV OVERHEAD LINES  
IN CONDITIONS OF THE LOSS OF RADIO CONTACT  
WITH THE GROUND CONTROL STATION**

*Аннотация.* Предлагается способ аварийного управления беспилотным летательным аппаратом (БЛА), используемым для проведения мониторинга технического состояния воздушной линии напряжением 6-10 кВ (ВЛ 6-10 кВ). Данный способ применяется в случае потери радиосвязи между БЛА и наземным пунктом управления и основан на активизации системы автоматического пилотирования, позволяющей продолжать полет БЛА в заранее установленный район аварийной посадки. Автопилотирование БЛА осуществляется посредством следящего электропривода (СП) и чувствительных датчиков, реагирующих на напряженность электромагнитного поля ВЛ 6-10 кВ.

*Ключевые слова:* беспилотный летательный аппарат, воздушная линия электропередачи, следящий электропривод, электромагнитное поле, автопилотирование.

*Abstract.* Offered a method of emergency control of an unmanned aerial vehicle (UAV) used for monitoring the technical condition of 6-10 kV overhead lines (6-10 kV). This method is used in case of loss of radio communication between the UAV and the ground point of control and is based on the activation of the automatic piloting, allowing to continue flying UAVs in a predetermined area of an emergency landing. Autosteering of UAV performed by the tracking actuator (SP) and sensitive sensors, which responsive to the electromagnetic field strength of 6-10 kV overhead.

*Keywords:* unmanned aerial vehicle, overhead power line, the tracking actuator, an electromagnetic field, autosteering.

В настоящее время прослеживается тенденция лавинообразного роста всестороннего использования различных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) как военными, так и гражданскими структурами. Не отстает в этой области и ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. Так на кафедре «Электроснабжение» активно проводится работа по адаптации БЛА для нужд электроэнергетики, а именно мониторинга технического состояния линий электропередачи 6-10 кВ (см. рис. 1) [1, 2].



**Рис. 1. Фотография с места проведения испытания БЛА – Мценский район электрических сетей филиал ОАО «МРСК Центра» - «Орелэнерго»**

Наиболее перспективным на сегодняшнее время является дистанционно-пилотируемый способ, позволяющий в режиме реального времени проводить мониторинг необходимой местности и объектов, а также участвовать в спасательных операциях. Оператор с наземного пункта управления полетами, визуально, с помощью камер, находящихся на БЛА, в зоне прямой видимости, управляет летательным аппаратом или вносит корректировки в полетное задание [3].

К аппаратной части БЛА предъявляются весьма высокие требования по обеспечению необходимых технических параметров и характеристик, в числе которых особое внимание уделяется обеспечению надежности и безопасности дистанционного пилотирования БЛА, обеспечению противоударности, пылевлагозащищенности, радиозащищенности, а также обеспечение электромагнитной совместимости с ВЛ 6-10 кВ [3].

Таким образом, непрерывный поиск принципиально новых инженерно-технических решений в области беспилотного воздухоплавания, является одной из актуальных задач, решение которой, в частности, требует постоянного поиска альтернативных, более эффективных методов дистанционного пилотирования БЛА с учетом появляющихся открытий и достижений в науке и технике [4].

Авторами данной публикации рассматривается способ аварийного управления БЛА, осуществляющим мониторинг технического состояния ВЛ 6-10 кВ, который может быть реализован в случае потери радиосвязи между БЛА и наземным пунктом управления. Предлагаемый вариант управления предполагает продолжение полета БЛА вдоль трассы ВЛ 6-10 кВ, причем управление БЛА осуществляется посредством аварийного автопилота со следящим электроприводом, использующим в качестве источника управляющих сигналов чувствительные элементы – емкостной антенный датчик и катушку индуктивности, реагирующие на электромагнитное поле ВЛ 6-10 кВ [5].

Одним из важнейших элементов современных автоматизированных систем управления различными объектами, в том числе беспилотными летательными аппаратами являются следящие приводы (СП).

Антенный датчик состоит из нескольких последовательно соединенных элементов, выполненных в виде петель из изолированного провода, на этих петлях, имеющих емкость относительно проводов ВЛ 6-10 кВ, создается напряжение, пропорциональное рабочему напряжению воздушной линии, которое затем усиливается и в виде задающего сигнала поступает в блок автоматического аварийного пилотирования.

Катушка индуктивности воспринимает индуктивную реакцию на ток в проводах ВЛ 6-10 кВ и служит для автоматической калибровки расстояния от БЛА до заданной ВЛ 6-10 кВ, так как ток нагрузки линии влияет на полное напряжение, наводимое в емкостном антенном датчике.

Установленные в носовой части БЛА, емкостной антенный датчик и катушка индуктивности позволяет аварийному автопилоту посредством СП позиционировать БЛА и обеспечивать стабилизацию режима его полета при неизменном курсе относительно ВЛ 6-10 кВ.

Рассмотрим классические функциональную и структурную схемы управления полетом БЛА по курсу вдоль ВЛ 6-10 кВ, представленные на рисунке 2, а, б) [4].

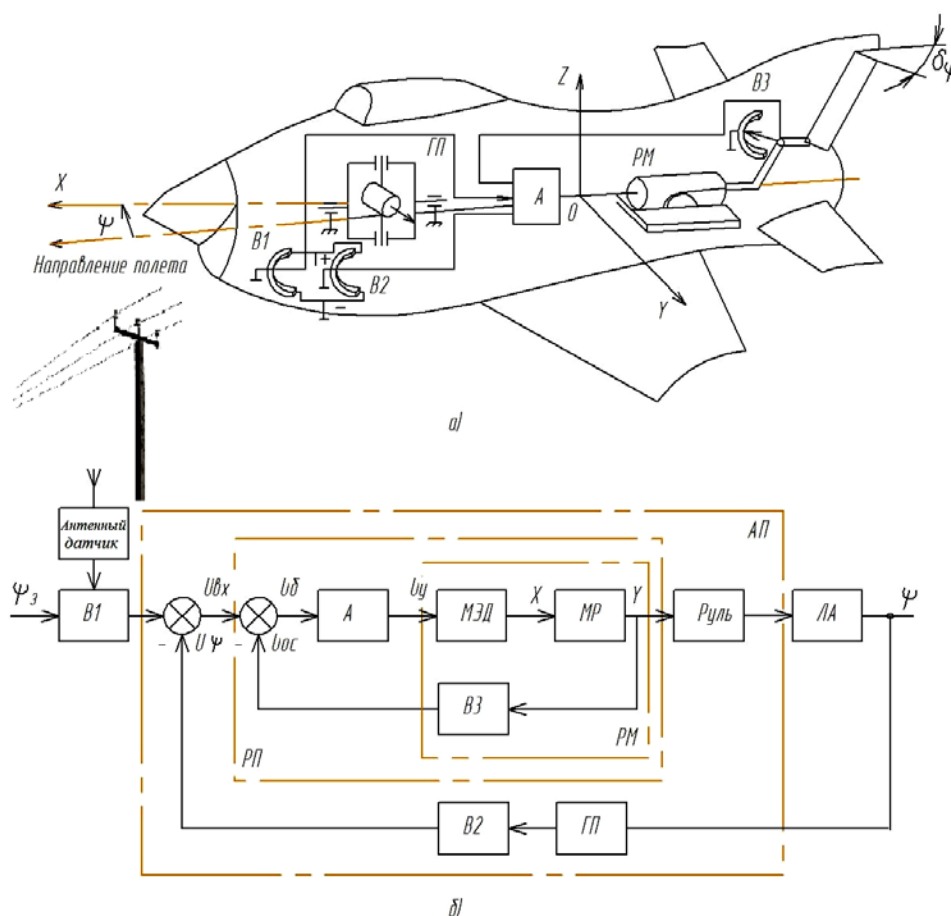


Рис. 2. Функциональная и структурная схемы управления полетом БЛА по курсу вдоль ВЛ 6-10 кВ

Структурная схема (см. рис. 2, б) включает в себя два контура: внутренний – рулевого электропривода (РЭП), обеспечивающего стабилизацию режима полета при неизменном курсе ( $\psi_3 = \text{const}$ ), и внешнего – аварийного автопилота АП, предназначенного для автоматического аварийного управления полетом (изменения курса).

Управляемым объектом следящего внешнего контура является БЛА, выходной координатой – угол рыскания  $\psi$  (угол между условной линией магнитного поля ВЛ 6-10 кВ и траекторией полета БЛА). Для измерения углового положения БЛА применяется гироскоп (ГП), ось которого заранее выставлена вдоль продольной оси БЛА. Сохраняя неизменным свое положение в течение своего полета, ось ГП служит указателем курса. В режиме стабилизации при отклонении БЛА от заданного курса с потенциометра В2, закреплённого в корпусе БЛА и перемещающегося с ним относительно движка, связанного с осью ГП, снимается сигнал  $U_\psi$ . Этот сигнал поступает на рулевой электропривод РП, отклоняющий руль направления БЛА. При отклонении руля возникает аэродинамический момент относительно оси  $OZ$ , разворачивающий самолет по курсу вдоль ВЛ 6-10 кВ до тех пор, пока сигнал с В2 не станет равным нулю. Разворот БЛА по курсу осуществляется путем формирования блоком автоматического аварийного пилотирования (в данном случае выступающего в роли оператора СП) соответствующей установки задающему потенциометру В1, электрически связанному с потенциометром В2 ГП. Стоит отметить, что аналогичным способом функционирует и подсистема стабилизации БЛА по высоте относительно ВЛ 6-10 кВ, функционирующая в функции усиления (ослабления) напряженности электромагнитного поля ВЛ 6-10 кВ, непрерывно фиксируемое емкостным антенным датчиком.

В режиме управления и при наличии ошибки рассогласования  $U_{\text{вх}}$  обеспечивается включение РЭП, отклонение руля и разворот БЛА на заданный угол.

Внутренний контур является исполнительным устройством системы управления (внешнего контура) и одновременно самостоятельным СП. Управляемым объектом этого СП является руль направления, выходной координатой – положение руля  $\delta\psi$ . Для определения положения руля в обратной связи ОС служит потенциометр В3, сигнал  $U_{\text{ос}}$  с которого сравнивается с управляющим сигналом  $U_{\text{вх}}$ . Разностный сигнал  $U_\delta$  усиливается в усилителе А и подается на рулевую машину РМ, отклоняющую руль БЛА до исчезновения ошибки рассогласования. В качестве РМ используется электрическая рулевая машина (см. рис. 2, б)), включающая механический редуктор, микроэлектродвигатель и потенциометр обратной связи В3 [4].

Таким образом, при проведении мониторинга технического состояния ВЛ 6-10 кВ, в случае потери радиосвязи с наземным пунктом управления, предлагаемый способ построения системы аварийного управления БЛА, в значительной степени повышает надежность дистанционного пилотирования БЛА и как следствие безопасность проведения его полета, что позволяет предотвратить материальный ущерб, связанный падением и потерей БЛА.

#### *Список используемых источников*

1. **Виноградов, А. В.** Способ мониторинга технического состояния элементов воздушной линии электропередачи / А. В. Виноградов, А. Е. Семенов, А. О. Мороз // Агротехника и энергообеспечение. – 2014. – № 3(3). – С. 64.

2. **Протокол** испытания беспилотного летательного аппарата для осмотра ВЛ на базе Мценского РЭС ОАО «МРСК Центра» – «Орелэнерго».

3. **Фомина, И. А.** Метод тестирования устойчивости телекоммутиационной системы управления беспилотных летательных аппаратов к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов : дис. ... канд. экон. наук : 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. – М., 2015. – 139 с.

4. **Смирнова, В. И.** Проектирование и расчет автоматизированных приводов: учебник для сред. спец. учеб. заведений / В. И. Смирнова, В. И. Разинцев. – М. : Машиностроение, 1990. – 368 с.

5. **Пенович Е. И.** Отыскание замыканий на землю в распределительных сетях 6-10 кВ : б-ка электромонтера. – Вып. 412. – М. : Энергия, 1975. – 120 с.

#### *References*

1. **Vinogradov, A. V.** A method of monitoring the technical condition of elements of the overhead power line / A. V. Vinogradov, A. E. Semenov, S. A. Moroz // Farming equipment and energy supply. – 2014. – N 3(3). – P. 64.

2. **Protocol** of testing of unmanned aircraft for inspection of overhead lines on the basis of the Mtsensk DEN of OJSC “IDGC of Center” – “Orelenergo”.

3. **Fomina, I. A.** Test Method of stability telecommutation UAV control system to the effects of ultrashort electromagnetic pulses : dis. ... Cand. econ. Sciences : 05.12.13 – Systems, networks and devices telecommunikaions. – M., 2015. – 139 p.

4. **Smirnov, V. I.** Design and calculation of automatic drives : the textbook for the media. Specialist. Proc. Institutions / V. I. Smirnov, V. I. Razintsev. – M. : Engineering, 1990. – 368 p.

5. **Penovich, E. I.** The search of earth fault in distribution networks 6-10 kV : Bk electrician. – V. 412. – M. : Energy, 1975. – 120 p.

Научное электронное издание

**В. И. ВЕРНАДСКИЙ:  
УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РЕГИОНОВ**

**Материалы Международной научно-практической конференции**

**ТОМ 4**

Компьютерное макетирование Т. Ю. Зотовой

**ISBN 978-5-8265-1637-9 (т. 4)**



Подписано к использованию 25.11.2016

Тираж 100 шт. Заказ № 479

Издательско-полиграфический центр  
ФГБОУ ВО «ТГТУ»

392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14.

Телефон (4752) 63-81-08, 63-81-33.

E-mail: [izdatelstvo@admin.tstu.ru](mailto:izdatelstvo@admin.tstu.ru)



