

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

*УСПЕХИ*  
*В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ*  
*ТЕХНОЛОГИИ*

**Том XXXIX**

**№ 13**

Москва  
2025

УДК 66.01-52  
ББК 24. 35  
У78

Рецензент:  
Российский химико-технологический университет  
имени Д. И. Менделеева

**Успехи в химии и химической технологии:** сб. науч. тр. Том XXXIX,  
У78 № 13 (304). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2025. – 199 с.

В сборнике «Успехи в химии и химической технологии» опубликованы статьи по актуальным вопросам в области синтеза и исследования свойств новых химических соединений и материалов, создания современных химических технологий и эффективных производств на их основе. Представленные в статьях результаты были предметом обсуждения на VI Межвузовской конференции молодых ученых с международным участием "Новые материалы и химические технологии", проведенной в декабре 2025 года на факультете Физико-математических и естественных наук Российского университета дружбы народов (РУДН) и РХТУ имени Д.И. Менделеева при участии МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Сборник находится в открытом доступе, научные статьи включены в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ) на платформе Elibrary.ru.

Материалы сборника представляют интерес для научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов химического профиля вузов, занимающимися исследованиями в области химии и химической технологии.

УДК 66.01-52  
ББК 24. 35

# Содержание

Эрнандес Пинтон Луис Мигель, Шушунова Т.Н., Лопаткин Д.С., Зюзько М.А. <b>Подготовка лидеров цифровой трансформации и устойчивого развития в системе высшего образования России и Кубы .....</b>	<b>7</b>
Лавданский А.М., Аверина Ю.М. <b>Перспективы искусственного интеллекта и его интеграция в 3Д - моделировании ювелирных изделий, как способ оптимизации производственных процессов .....</b>	<b>12</b>
Узбеков Р.Ш., Челноков В.В., Аверина Ю.М., Ли Сяовень <b>Повышение энерго-ресурсоэффективности крупнотоннажных криогенных производств: проблемы и современные методы оптимизации .....</b>	<b>15</b>
Мирзоева П.А., Смирнова С.С., Маркова Е.Б. <b>Корреляция между свойствами поверхности и каталитической активностью ванадатов редкоземельных элементов при крекинге пропана .....</b>	<b>20</b>
Пронина Т.В., Зверева О.В. <b>Сравнительный анализ патентов по методам переработки отработанных масел .....</b>	<b>24</b>
Сиючева В.Р., Сяо Вень Ли, Зверева О.В. <b>Методологические основы выбора систем водоочистки для промышленных предприятий.....</b>	<b>27</b>
Немеренко О.В., Смирнова С.С., Маркова Е.Б. <b>Влияние природы редкоземельных элементов на активность и селективность ванадитовых катализаторов крекинга пропана.....</b>	<b>31</b>
Каштанова Н.А., Зенкова А.А., Полтавская С.А., Сыхраннова М.В., Сорокина А.Д. <b>Получение водорода в реакции парового риформинга этанола на никелевых катализаторах: влияние состава алюмо-цериевого носителя.....</b>	<b>34</b>
Холодова Е. А., Журавлева О. С. <b>Инновационные аспекты анализа плодородия почв для оценки ресурсоэффективного потенциала земельных ресурсов .....</b>	<b>38</b>
Ольховка А.А. <b>Синтез и исследование функциональных свойств квантовых точек на основе наночастиц перовскита.....</b>	<b>43</b>
Криворотова С.А., Зверева О.В. <b>Организационно-экономический анализ и результат бенчмаркинга деятельности двух предприятий прототипов.....</b>	<b>45</b>
Горшков Ф.Е., Зверева О.В. <b>Сравнительный анализ ресурсосберегающих характеристик реакторов идеального смешения и вытеснения для экзотермических реакций.....</b>	<b>48</b>

Тотомир К.Ю., Садоян Д.Г., Березина К.П., Крючкова Т.А., Шешко Т.Ф., Чередниченко А.Г. <b>Композитные каталитические системы на основе GdCoO<sub>3</sub> нанесенного на оксидные носители, для процесса углекислотной конверсии метана.....</b>	<b>51</b>
Стародубцева Н.Ю., Журавлева О.С. <b>Анализ современных методов учета гумификации при оценке лесных угодий .....</b>	<b>57</b>
Купчук Д.А., Журавлева О.С. <b>Обзор инновационных моделей и алгоритмов управления плодородием почв .....</b>	<b>60</b>
Анисимова Ю.А., Багзина Д.Д., Крючкова Т.А., Братчикова И.Г., Шешко Т.Ф., Чередниченко А.Г. <b>Модификация GdCoO<sub>3</sub> протонированием для селективного гидрирования монооксида углерода в C<sub>2</sub>–C<sub>4</sub> олефины .....</b>	<b>65</b>
Гасов Д.Ю., Чередниченко А.Г. <b>Исследование процесса каталитического получения биодизеля из сырья животного происхождения.....</b>	<b>69</b>
Покровский С.Я., Пигас А.В., Зверева О.В. <b>Современное состояние и тенденции развития мирового и российского рынков полиуретанов .....</b>	<b>73</b>
Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я. <b>Методы подготовки металлических и неметаллических поверхностей для повышения адгезии лакокрасочных покрытий .....</b>	<b>76</b>
Семенова С.В., Лазаренко А.С., Межекей А.М., Шешко Т.Ф., Крючкова Т.А., Чередниченко А.Г. <b>Влияние калий-индуцированных кислородных вакансий на каталитическую активность GdFeO<sub>3</sub> в гидрировании CO/CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>79</b>
Покровский С.Я., Журавлева О.С. <b>Методы обработки и анализа данных при моделировании динамики гумификации .....</b>	<b>83</b>
Ткабо Тевельде, Чередниченко А.Г. <b>Влияние модификации азотной кислотой активированного угля АГ-3 на адсорбцию о-ксилола.....</b>	<b>86</b>
Анистратов Н. А., Муштаков А. Г., Моисеева А. Р., Маркова Е. Б. <b>Адсорбция красителей жёлтый солнечный закат и кристаллический фиолетовый на MIL-100(Fe).....</b>	<b>89</b>
Криворотова С.А., Журавлева О.С. <b>Анализ возможностей традиционных статистических методов и современных алгоритмов машинного обучения для решения задач почвенного мониторинга.....</b>	<b>94</b>
Фионова Е.А., Фионов Ю.А. <b>Контроль дисперсии CeO<sub>2</sub> методом абсорбционной спектроскопии in-situ в системах Ni-Al-Ce с различными соотношениями Al/Ce .....</b>	<b>97</b>

Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я. <b>Технология и физико-химические основы производства порошковых лакокрасочных покрытий</b> .....	100
Хоанг Чунг Дат <b>Химическое образование и наука Вьетнама. Путь развития и перспективные направления</b> .....	103
Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я. <b>Эффективные методы нанесения порошковых лакокрасочных покрытий: сравнительный анализ и перспективы применения</b> .....	106
Чередниченко В.А., Гасов Д.Ю., Чередниченко А.Г., Глинушкин А.П. <b>Синтез регуляторов роста растений на основе производных 1,2,3-бензотриазола и разработка новых препаративных форм на их основе</b> .....	109
Новикова Т.Д., Зверева О.В., Журавлева О.С. <b>Customer journey натуральных добавок: стратегия продвижения натуральных пищевых добавок на основе анализа потребительского пути</b> .....	112
Гусева Н.В., Зверева О.В., Рублева С.А., Разводов А.В. <b>К вопросу разработки замкнутых систем водоснабжения для малотоннажных химических производств</b> .....	116
Трошкова А.П., Копылова Л.Е., Журавлева О.С. <b>Системный технологический скаутинг как инструмент повышения эффективности инновационного развития промышленных компаний в условиях трансформации</b> .....	119
Зверева О.В., Рублева С.А., Верхососова А.И., Разводов А.В. <b>Требования к повторно используемым сточным водам</b> .....	125
Кудая Яво Юг, Ндао Ибрахима <b>Исторические аспекты развития химического образования и науки в Того и Сенегале</b>	128
Челкина К.С., Зверева О.В. <b>Сравнительный анализ ресурсоэффективности технологий переработки макулатуры различного качества</b> .....	131
Просветова Д.Ю., Савинков С.В. <b>Анализ способов адсорбции CO<sub>2</sub> на предприятиях российского химико-технологического комплекса</b> .....	134
Разводов А.В., Зверева О.В., Григорьев А.Е. <b>Сравнительный анализ эффективности рециклинга стеклянных отходов через систему залоговой стоимости и отдельного сбора для города Москвы</b> .....	136
Пигас А.В., Журавлева О.С. <b>Цифровые инструменты управления землепользованием дерново-подзолистых почв на основе прогнозирования их плодородия</b> .....	140
Разводов А.В., Зверева О.В. <b>Освоение метода производства высокочистого изопропилового спирта</b> .....	145

Савинков С.В., Азарова Ю.А. <b>Анализ современных методов производства полиэтилена с учётом рекомендаций справочников НДТ .....</b>	<b>148</b>
Вольных М.Н., Зверева О.В. <b>Сравнительный анализ технологий рециклинга полимерных отходов .....</b>	<b>151</b>
Вахитов М.Д., Прохоров В.А. <b>Ассиметричный органокатализ и его значение в современной химической науке .....</b>	<b>155</b>
Самаркина А., Журавлева О.С. <b>Современные подходы к моделированию гумификации в лесном хозяйстве .....</b>	<b>158</b>
Акчурин И.И., Журавлева О.С. <b>Анализ регрессионных и нейросетевых моделей для разработки алгоритма анализа динамики гумификации .....</b>	<b>163</b>
Савинков С.В., Панферова Е. М. <b>Современные методы производства драгоценных металлов.....</b>	<b>166</b>
Микита А.А., Журавлева О.С. <b>Сравнительный анализ ключевых технологий извлечения лития и его соединений из попутных пластовых рассолов нефтяных месторождений.....</b>	<b>169</b>
Русакова А.А., Журавлева О.С., Савинков С.В. <b>Анализ современных методов производства фенола в России и за рубежом.....</b>	<b>176</b>
Салимова О.С., Савинков С.В. <b>Увеличение ресурса срока оборудования посредством нанесения цинк-никелевых покрытий .....</b>	<b>181</b>
Бредихина К.А., Манюкова И.И. <b>Математические методы оценки коллективных социальных рисков в условиях нефтехимического производства .....</b>	<b>184</b>
Ярышева Д.Л., Савинков С.В. <b>Цифровизация и проблемы сбора персональных данных в химической отрасли .....</b>	<b>187</b>
Зюзько М.А., Аверина Ю.М., Франк Е Гонзалез Гонзале, Даниэль Альфонсо Робайна <b>На пути к устойчивому управлению университетом: подход Технологического университета Гаваны (CUJAE) .....</b>	<b>190</b>
Лавданский А.М., Аверина Ю.М. <b>Роль социо-управленческих факторов при выстраивании взаимодействия промышленных компаний и университетских наук .....</b>	<b>193</b>
Комротов И.С., Челноков В.В., Аверина Ю.М., Ли Сяовень <b>Интеллектуальная система прогнозирования качества нефти: интеграция данных синтетических маркеров и машинного обучения.....</b>	<b>195</b>

УДК 378.014:005.591.6(47+729.1)

Эрнандес Пинтон Луис Мигель, Шушунова Т.Н., Лопаткин Д.С., Зюзько М.А.

### **Подготовка лидеров цифровой трансформации и устойчивого развития в системе высшего образования России и Кубы**

Эрнандес Пинтон Луис Мигель - госслужащий, министерство высшего образования, Куба;

Шушунова Т.Н. - доцент, к.т.н., доцент кафедры менеджмента и маркетинга РХТУ им. Д.И. Менделеева

Лопаткин Д.С. - доцент, к.э.н., зав. кафедрой менеджмента и маркетинга РХТУ им. Д.И. Менделеева

Зюзько М.А. - студент 4 курса по направлению 38.03.02 Менеджмент РХТУ им. Д.И. Менделеева

*В статье проведен сравнительный анализ стратегий подготовки управленцев для цифровой трансформации экономики в России и на Кубе. В работе выявляются и сопоставляются две контрастные образовательные модели, сформированные разными социально-экономическими системами. Российский подход характеризуется как гибкая, рыночно-ориентированная экосистема, предлагающая широкий спектр специализированных программ в партнёрстве с бизнесом. Кубинская модель представляет собой централизованную государственную систему, готовящую администраторов-плановиков для решения задач национального развития. Каждая из моделей обладает уникальными преимуществами, но сталкивается и со специфическими вызовами, такими как образовательное неравенство и «утечка мозгов». Авторы делают вывод об отсутствии универсального решения и необходимости баланса между технологической эффективностью и социальными приоритетами в образовательной политике.*

*Ключевые слова: цифровая трансформация экономики, образовательные модели, человеческий капитал, рыночная экосистемы, государственное планирование.*

### **Training leaders of digital transformation and sustainable development in the higher education systems of Russia and Cuba**

Hernandez Pinton Luis Miguel, Shushunova T.N., Lopatkin D.S., Zyuzko M.A.

*This article provides a comparative analysis of management training strategies for digital economic transformation in Russia and Cuba. It identifies and compares two contrasting educational models shaped by different socioeconomic systems. The Russian approach is characterized as a flexible, market-oriented ecosystem offering a wide range of specialized programs in partnership with businesses. The Cuban model is a centralized state system that trains administrators and planners to address national development challenges. Each model offers unique advantages but also faces specific challenges, such as educational inequality and brain drain. The authors conclude that there is no universal solution and that a balance between technological efficiency and social priorities in educational policy is essential.*

*Keywords: digital transformation of the economy, educational models, human capital, market ecosystem, state planning.*

Наступление эпохи цифровой экономики, определяемой повсеместным внедрением технологий, превращением данных в ключевой актив и переходом к платформенным моделям хозяйствования, формирует устойчивый запрос на качественное обновление систем образования. Сложность этого вызова заключается в том, что он не ограничивается техническим оснащением аудиторий или введением отдельных новых дисциплин. Речь идёт о более глубоком переосмыслении: для какой цели готовить человека, какое содержание должно стать ядром учебного процесса и какие педагогические методы будут адекватны новым задачам. В этих условиях образование эволюционирует от относительно замкнутого института, завершающего этап первичной социализации, к открытой и непрерывной системе накопления человеческого капитала. Именно его качество – совокупность знаний, компетенций, здоровья и мотивации населения – становится в XXI веке основным фактором, определяющим конкурентоспособность национальной экономики и устойчивость общественного развития. Следовательно, стратегической целью образования становится целенаправленное формирование

комплекса способностей, отвечающих динамике цифровой среды. К ним относятся не только базовая цифровая грамотность, но и более сложные навыки: критический анализ информации, креативное решение нестандартных задач, эффективная коммуникация в гибридных средах и, что особенно важно, способность к самостоятельному постоянному обучению. Система образования трансформируется в ключевой социальный механизм производства и воспроизводства человеческого капитала, от эффективности которого напрямую зависит будущее социально-экономическое благополучие. Наступление эпохи технологических преобразований, предусматривающих внедрение прорывных инноваций в химии, энергетике и экологии, превращение научных разработок в ключевую активность и переход к устойчивым моделям производства, формирует устойчивый запрос на качественное обновление систем образования. Сложность вызова заключается в необходимости готовить не просто менеджеров, а лидеров, способных управлять разработкой и внедрением новых технологий в химической, нефтехимической промышленности, энергетике и в решении экологических проблем. Речь идет о

глубоком переосмыслении того, какими компетенциями должен обладать управленец для осуществления технологического прорыва в этих критически важных секторах.

Стратегической целью становится формирование способностей, отвечающих динамике цифровой среды в прикладных отраслях: от критического анализа данных сложных производственных систем до управления жизненным циклом «зеленых» технологий и организации кросс-функциональных команд исследователей, инженеров и экологов. Этот приоритет закономерно вытекает из новой роли образования, поскольку именно технологические менеджеры выступают главными проводниками цифровой и экологической трансформации на уровне промышленных холдингов, ТЭК и государственных программ. Их задача – не только освоить конкретные инструменты (цифровые двойники, AI для прогнозной аналитики оборудования, технологии замкнутого цикла), но и организовать сложные процессы технологической модернизации, преодолевая сопротивление среды и балансируя инновационные риски. Сравнительный анализ подходов России и Кубы в этой сфере показателен, демонстрируя, как формируются две контрастные модели подготовки таких кадров: адаптивная рыночная экосистема и целенаправленная государственная система.

Их задача - не только освоить конкретные технологии, но и организовать сложные процессы трансформации, преодолеть сопротивление среды и сбалансировать инновационные риски[1]. Поэтому то, как национальная система образования отвечает на этот вызов, становится своеобразным зеркалом, отражающим её глубинные принципы и возможности. Сравнительный анализ подходов России и Кубы в этой сфере особенно показателен. Он раскрывает, как исторически сложившиеся политические и экономические системы, доминирующие идеологические установки и ресурсы определяют сам характер подготовки кадров. В результате формируются две ярко выраженные и контрастные модели, которые условно можно обозначить как адаптивную рыночную экосистему и целенаправленную государственную систему. Каждая из них предлагает собственный ответ на глобальный запрос цифровой эпохи, демонстрируя тем самым отсутствие универсального решения и зависимость образовательной стратегии от национальной экономической модели развития.

Как показали исследования, несмотря на общую историческую основу в виде советской модели, к настоящему времени эти системы демонстрируют заметную специфику.

Российская система высшего образования за последние десятилетия подверглась глубокой либерализации и коммерциализации. В ней сложилась конкурентная среда, сильно дифференцированная по качеству и ресурсам, с активным внедрением рыночных механизмов. Реакция на вызовы цифровой экономики здесь более

хаотична и динамична: возникают новые цифровые специальности, внедряются онлайн-курсы, развиваются корпоративные университеты и партнерства с IT-сектором. Однако эта адаптация сопровождается ростом неравенства в доступе к качественному образованию и его зависимости от экономического положения семьи и региона.

Высшее образование в области подготовки управленческих кадров в России развивается как сложная, высокодифференцированная экосистема, быстро адаптирующаяся к запросам цифровой экономики. Реакция на вызовы разработки новых технологий здесь более динамична: появляются новые специальности в области химической инженерии и энергетики, внедряются лабораторные симуляторы, развиваются корпоративные университеты и партнерства с промышленными гигантами. Наблюдается разнообразие образовательных программ на всех уровнях. Помимо традиционных направлений «Менеджмент» (38.03.02), появляются узкоспециализированные магистерские программы, напрямую отвечающие на вызовы цифровизации. Например, магистерская программа «Организация производства и технологическое предпринимательство» по направлению подготовки 27.04.06 Организация и управление наукоемкими производствами в Российском химико-технологическом университете имени Д.И. Менделеева (РХТУ имени Д.И. Менделеева). Ее цель – подготовка специалистов, владеющих инструментами организации производства, экономического анализа и возможностей нахождения прорывных возможностей с использованием новых технологий для химической и нефтехимической промышленности, устойчивости и экологии. Аналогичные программы, такие как «Инноватика», предлагаются и на уровне бакалавриата. Ключевой особенностью является глубокое содержание программ. Учебные планы насыщены дисциплинами, формирующими компетенции для цифровой трансформации и включает дисциплины, которые обеспечивают компетенции по разработке и внедрению новых объектов интеллектуальной собственности и наилучших доступных технологий (НДТ), управлению проектами цифровой трансформации на предприятиях, разработке математических и компьютерных моделей для симуляции промышленных процессов, нефтехимических производств, промышленных систем кооперация работы бизнеса (производств), науки и образования для создания единых целей совместной деятельности. Магистерские программы делают акцент на сквозных технологиях: блокчейне, смарт-контрактах, цифровых платформах, анализе больших данных, IT-архитектуре предприятия и искусственном интеллекте, возобновляемой энергетике, биотехнологиях для очистки стоков и моделирования наноматериалов.

Российская модель активно использует гибридные форматы обучения и тесную интеграцию с

реальным сектором. Программы часто реализуются в очно-заочном или полностью дистанционном формате, что делает их доступными для работающих специалистов. Ключевым элементом является привлечение к преподаванию и разработке курсов практиков из ведущих компаний и государственных структур. Например, в реализации магистерской программы «Организация производства и технологическое предпринимательство» в РХТУ имени Д.И. Менделеева участвуют партнеры из Российского союза химиков, ГБУ «Агентство инноваций города Москвы», АО «Газпромнефть МЗСМ», ООО «ИнноХаб», ООО «ДОМСОФТ», Коммуникационного агентства SALO (ООО «САЛО») и др. Также РХТУ имени Д.И. Менделеева реализует совместный проект Минобрнауки и Минцифры России «Цифровые кафедры» в рамках федерального проекта «Университеты для поколения лидеров» национальной программы «Молодежь и дети». Студенты помимо основной специальности могут получить новую профессию в сфере информационных технологий в рамках программы «Применение технологий генеративного искусственного интеллекта в профессиональной деятельности». Это обеспечивает качественную подготовку востребованных, высококвалифицированных, конкурентоспособных специалистов в области IT-отрасли, владеющих современным научным знанием, инновационными технологиями и профессиональными компетенциями

Однако эта модель сталкивается с вызовами: сокращение бюджетных мест по управленческим направлениям и ограничение по максимальному количеству платных мест, растущее неравенство в доступе к качественному образованию между столичными и региональными вузами, несмотря на общий масштаб системы (около 700 вузов и свыше 4.3 млн студентов)[2].

В отличие от российской кубинская модель высшего образования сохранила сильную этатистскую, централизованную ориентацию с акцентом на всеобщий бесплатный доступ и тесную увязку учебных программ с конкретными потребностями народного хозяйства и социальными проектами государства. Цифровизация здесь воспринимается, в первую очередь, как инструмент повышения эффективности управления государством и расширения доступа к знаниям, но в рамках жестко заданных идеологических и содержательных рамок. Социальная функция образования доминирует над рыночной, а адаптация к запросам цифровой экономики идет осторожно, с оглядкой на принципы социальной справедливости.

Система подготовки управленческих кадров на Кубе является органичной частью социалистической модели высшего образования, где доминируют принципы универсального бесплатного доступа и подчинения образовательных задач целям государственного планирования. В основе этой модели лежит подготовка не столько «менеджеров» в рыночном понимании, сколько государственных

администраторов и специалистов по плановой экономике. Подготовка управленческих кадров для промышленности традиционно интегрирована в программы по общественным наукам в ведущих вузах, таких как Гаванский университет. Фокус смещен с конкуренции и максимизации прибыли на эффективное распределение ресурсов, выполнение плановых показателей и обеспечение социальной справедливости в условиях ограниченных ресурсов и экономической блокады. По данным Министерства высшего образования Кубы (MES) для учебного года 2025-2026 на Кубе будет доступно более 100 тысяч мест для высшего образования, распределённых по 113 университетским специальностям и 65 программам краткосрочного обучения. Однако студенты не всегда смогут получить доступ к желаемой специальности из-за приоритетов, установленных правительством. Студенты должны смириться с выбором специальности, отличной от предпочитаемой, и затем попробовать изменить ее, если система это позволяет. Только те, кто показывает выдающиеся результаты на конкурсах и олимпиадах, могут напрямую поступить на определенные специальности[3].

Система высшего образования на Кубе активно развивает подготовку менеджеров по цифровой трансформации в рамках национальной стратегии информатизации и цифровизации с акцентом на государственные вузы и интеграцию ИИ в управление. Учебные программы 50 государственных вузов разрабатываются и согласуются с Министерством высшего образования (MES) для обеспечения кадрами приоритетных направлений национального развития. Программы по «менеджменту» или «управлению» интегрированы в более широкие специальности по государственному управлению, экономическому планированию или информатике. Программы ориентированы на педагогические и административные кадры, учитывая экономические ограничения и фокус на социалистической модели. Учебные программы делают акцент на макроэкономическом планировании, государственном управлении, социальной экономике и национальной экономической безопасности. Внедрение тем, связанных с цифровизацией, происходит осторожно и рассматривается сквозь призму повышения эффективности государственного управления («электронное правительство»), развития национальной IT-индустрии и обеспечения технологического суверенитета. Ориентация на коммерческие цифровые платформы, венчурное финансирование или трансформацию бизнес-моделей частных корпораций, характерная для российских программ, здесь вторична или отсутствует. Гаванский университет лидирует в подготовке, интегрируя цифровые компетенции в факультеты экономики и менеджмента через дисциплины по ИИ, кибербезопасности и управлению знаниями. Цифровизация в образовании Куба ускоряет трансформацию высшего образования, внедряя ИИ в

академическое управление и повышая цифровые навыки студентов и преподавателей. В 2025 году на саммите UE-CELAC в Санта-Марте (Колумбия) подчеркнута роль ИИ в генерации знаний и доступе к ресурсам, несмотря на вызовы инфраструктуры. Кубинские педагоги проходят подготовку по цифровым инструментам, что напрямую влияет на подготовку менеджеров цифровой трансформации[4]. Подготовка менеджеров нацелена не на корпоративный сектор, а на управление цифровизацией в университетах, научных центрах и государственных учреждениях, делая акцент на управленческих методиках, теории изменений (change management), кибербезопасности и применении доступных цифровых инструментов для оптимизации государственных процессов, а не на изучении коммерческих рыночных задач.

Ключевым преимуществом кубинской системы является её всеобщий охват и доступность. Валовой коэффициент охвата высшим образованием, составляющий около 49%, является одним из самых высоких в Латинской Америке и свидетельствует о приоритете развития человеческого капитала. Отсутствие платы за обучение и развитая система социальной поддержки студентов снимают финансовые барьеры[5].

Тем не менее, модель сталкивается с серьезными системными ограничениями. Хронические экономические трудности, дефицит современных технологий и ограниченный доступ к международным образовательным ресурсам замедляют модернизацию учебных процессов. Главным же вызовом остается «утечка мозгов» – отток высококвалифицированных выпускников, включая потенциальных управленцев и IT-специалистов, за рубеж в поисках более высоких доходов и профессиональных возможностей, что подрывает отдачу от государственных инвестиций в образование.

Следовательно, основные направления развития систем образования в эпоху цифровой экономики лежат в плоскости синтеза технологических инноваций с усилением социальной роли образования. Система подготовки должна быть неразрывно связана с национальными стратегическими инициативами и технологическими платформами (например, в области водородной энергетики, глубокой переработки углеводородов, рециклинга полимеров). Выпускник должен понимать свое место не только в корпоративной, но и в национальной инновационной системе, что требует включения в учебные программы элементов технологической политики и анализа глобальных технологических цепочек.

Таким образом, подготовка руководителей для управления разработкой новых технологий в базовых отраслях представляет собой формирование **менеджеров технологических систем**. Их ключевая функция – осуществление осознанного выбора вектора развития на стыке физико-химических закономерностей,

экономической целесообразности, цифровых возможностей и экологических ограничений. Образовательная система должна эволюционировать в сторону создания исследовательско-управленческих полигонов, где будущие лидеры учатся не оперировать абстрактными категориями, а управлять процессами технологических изменений в химии, энергетике и промышленной экологии. Эффективность этой подготовки становится прямым фактором, определяющим способность страны осуществлять технологический суверенитет и структурную перестройку экономики.

Это предполагает не только повсеместное внедрение цифровых инструментов и пересмотр содержания обучения, но и создание поддерживающей социальной инфраструктуры, систем раннего развития, программ непрерывного образования для всех возрастов, механизмов снижения образовательного неравенства. Опыт разных стран, будь то социально-консервативная модель Кубы или либерально-рыночная модель развития России, показывает, что не существует универсального рецепта. Успешной будет та система, которой удастся найти устойчивый баланс между подготовкой конкурентоспособных кадров для цифрового рынка труда и сохранением образования как общественного блага, гарантирующего социальную мобильность, сплоченность и развитие человеческого потенциала в его целостности. Будущее за гибридными моделями, способными гибко реагировать на технологические изменения, не теряя при этом своей гуманистической и социальной сущности. Подготовка управленческих кадров для цифровой эпохи в России и на Кубе следует принципиально разным траекториям. Российская модель демонстрирует гибкость, разнообразие и высокую скорость адаптации к запросам рынка, формируя «архитекторов цифровых изменений» для конкретных компаний и отраслей. Её сила – в практической ориентированности и связи с живой экономикой, а слабость – в рисках усиления образовательного неравенства. Кубинская модель, напротив, остается верной принципам всеобщности и подчинения образования национальным социальным целям, готова «администраторов цифрового развития» в рамках государственной системы. Её сила – в справедливости и всеохватности, а уязвимость – в хроническом дефиците ресурсов и оттоке талантов.

Обе модели, несмотря на свои противоречия, ищут ответ на один из главных вызовов современности. Будущая эффективность этих систем будет определяться не только их способностью внедрять новые технологии в учебный процесс, но и умением решать свои системные проблемы: России – смягчать социальное неравенство в доступе к качественному образованию, а Кубе – создавать условия для реализации человеческого капитала внутри страны. В этом поиске баланса между рыночной эффективностью и социальной справедливостью, между глобальной конкурентоспособностью и национальным

суверенитетом заключается основное содержание современной трансформации высшего образования.

### Литература

1. Дамаданов, Д. Н. Тренды цифровизации в сфере профессионального развития управленческих кадров / Д. Н. Дамаданов, Т. Н. Шушунова // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – Т. 35, № 1(236). – С. 22-24. – EDN BNVKBV.

2. Столь А. В. Доступность высшего образования в контексте регионального неравенства // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2022. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dostupnost-vysshego-obrazovaniya-v-kontekste-regionalnogo-neravenstva> (дата обращения: 18.12.2025).

3. Куба предложит более 100 тысяч мест в вузах, но с ограничениями в выборе специальности. URL: <https://ru.cibercuba.com/noticias/2025-04-14-u1-e135253-s27061-nid300884-cuba-ofrecera-100-mil-plazas-universitarias> (дата обращения: 17.12.2025).

4. Центры цифрового образования детей IT Куб: инновации и возможности. URL: <https://cuba-tour.ru/blog/2025/11/12/czentry-czifrovogo-obrazovaniya-detej-it-kub-innovaczii-i-vozmozhnosti/> (дата обращения: 18.12.2025).

5. Кожевникова В. В. Образовательная система Кубы: политические и социальные аспекты // Вестник СПбГИК. 2023. №4 (57). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrazovatel'naya-sistema-kuby-politicheskie-i-sotsialnye-aspekty> (дата обращения: 17.12.2025).

УДК 658

Лавданский А.М., Аверина Ю.М.

## Перспективы искусственного интеллекта и его интеграция в 3D - моделировании ювелирных изделий, как способ оптимизации производственных процессов

Лавданский Анатолий Максимович – аспирант; [t.lavd@ya.ru](mailto:t.lavd@ya.ru).

Аверина Юлия Михайловна – к.т.н., заведующий кафедрой Логистики и Экономической Информатики;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассматриваются перспективы и практические аспекты интеграции технологий искусственного интеллекта (ИИ) в процессы 3D-моделирования ювелирных изделий. Исследуется роль ИИ в автоматизации создания дизайна, оптимизации производственных циклов, снижении издержек и повышении персонализации продукции. Анализируются технологические решения, этапы внедрения, экономический эффект, а также ключевые требования для успешной интеграции ИИ в ювелирное производство.*

*Ключевые слова: искусственный интеллект, 3D-моделирование, ювелирные изделия, оптимизация производства, генеративный дизайн, автоматизация, персонализация, экономическая эффективность.*

## The prospects of artificial intelligence and its integration into 3D modeling of jewelry as a way to optimize production processes

Lavdanskiy A.M., Averina U.M.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article examines the prospects and practical aspects of integrating artificial intelligence (AI) technologies into the 3D modeling processes of jewelry. It explores the role of AI in design automation, optimization of production cycles, cost reduction, and increased product personalization. Technological solutions, implementation stages, economic impact, as well as key requirements for successful AI integration in jewelry manufacturing are analyzed.*

*Keywords: artificial intelligence, 3D modeling, jewelry, production optimization, generative design, automation, personalization, economic efficiency.*

### Введение

В условиях высокой конкуренции на ювелирном рынке ключевыми факторами успеха становятся скорость, гибкость и эффективность производства. Традиционные методы проектирования сталкиваются с вызовами современности: растущим спросом на персонализацию, необходимостью сокращения времени выхода на рынок и оптимизацией затрат. Интеграция искусственного интеллекта в 3D-моделирование позволяет существенно оптимизировать процессы: от сокращения времени на разработку дизайна до снижения количества производственного брака. Данная статья исследует возможности ИИ в трансформации процессов создания ювелирных изделий, фокусируясь на практических и экономических аспектах его внедрения.

### Актуальность интеграции ИИ

Актуальность темы обусловлена необходимостью адаптации ювелирных предприятий к быстро меняющимся рыночным требованиям. Внедрение ИИ позволяет [2, 4, 5]:

- Автоматизировать создание сложных дизайнов;
- Сократить время разработки новых продуктов;

- Снизить издержки за счёт минимизации ошибок и переделок;
- Реализовать массовую персонализацию изделий на основе алгоритмов машинного обучения и генеративного дизайна.

Цель статьи — продемонстрировать, как современные технологии ИИ трансформируют процессы 3D-моделирования в ювелирной отрасли, способствуя оптимизации производства и повышению конкурентоспособности.

### Современное состояние отрасли

Текущий процесс 3D-моделирования в ювелирной индустрии базируется на CAD-системах (Rhino, MatrixGold, ZBrush). Основные этапы включают техническое задание, создание прототипа и финальное производство. Существующие подходы к моделированию требуют ручной настройки геометрии в изделиях, а также опытный поиск технологических и визуальных решений (создание прототипов), что приводит к высоким затратам и необходимости в квалифицированных специалистах. Эти ограничения затрудняют автоматизацию и масштабирование процессов.

### Технологические решения ИИ для 3D-моделирования

Интеграция ИИ возможна не на всех этапах производственной цепочки. Основные требования

для внедрения включают: повторяемость операций, наличие цифровой инфраструктуры, достаточный объём качественных данных, экономическую целесообразность, гибкость процесса.

**Этап постановки технического задания**

ИИ может использоваться для генерации графических эскизов на основе текстовых описаний (например, с помощью Stable Diffusion, рис. 1), что ускоряет взаимодействие с клиентом и сужает варианты дизайна, а методы коллаборативной фильтрации позволяют прогнозировать предпочтения клиентов, повышая коэффициент принятия дизайна [6, 8].

**Этап 3D-моделирования**

Генеративные модели (GAN, VAE, диффузионные модели) позволяют создавать 3D-модели по

фотографии или описанию (например, с помощью Tripo AI, рис. 2) [3]. Это сокращает время моделирования с недель до часов. Однако существуют ограничения: сгенерированные модели часто требуют ручной доработки для обеспечения точности критических параметров и соответствия производственным требованиям [1].

Искусственный интеллект работает примерно по тому же алгоритму, что и при ручном моделировании: создание формы, деление ее на функциональные части, подготовка поверхности (ретопология сетки модели) для нанесения фактуры и дальнейшая проработка модели для рендеринга и анимации (рис.3).



Рис.1. Примеры генерации изображений ювелирных изделий по описанию при помощи нейросетей



Рис.2. Примеры генерации 3д – моделей ювелирных изделий по фотографиям при помощи нейросетей.

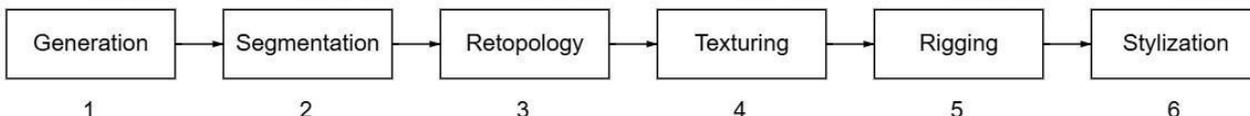


Рис.3. Алгоритм построения модели при помощи нейросети Tripo AI.

**Вспомогательные технологии ИИ**

В настоящее время для оптимизации процессов производства разработан ряд машинных технологий, которые позволяют решать ключевые проблемы в области работы ювелирного предприятия: от

автоматического контроля качества изделий, до рекомендательных систем на этапе работы с клиентом. Для понимания применимости ИИ в процессах ювелирного производства, необходимо описать ключевые технологические этапы (рис.4).



Рис. 4. Технологическая схема производства ювелирного изделия.

Поскольку производство ювелирного украшения - сложный, многогранный и, зачастую, непредсказуемый процесс, мы выделяем шесть ключевых этапов для упрощения понимания специфики данных процессов, а также потенциальной возможности внедрения искусственного интеллекта. Исследование интеграции ИИ в производственную цепочку, предполагает некоторые факторы применимости к конкретному процессу. Так, в контексте данного исследования, можно выделить следующие требования к процессу, для возможности интеграции в него искусственного интеллекта [7]:

- Генеративный дизайн: автоматическое создание оптимальных форм с учётом материала и веса.
- Синтез текстур и узоров: генерация уникальных гравировок и паттернов.
- Автоматический контроль качества: выявление дефектов в 3D-моделях.
- Оптимизация процессов печати/литья: подбор параметров для улучшения качества.
- Рекомендательные системы: подбор материалов и дизайнов для клиентов.

#### Интеграция ИИ в рабочий процесс

Внедрение ИИ в процессы происходит по следующим этапам [9]:

1. Анализ потребностей компании и определение областей для автоматизации.
2. Выбор технологий и инструментов.
3. Разработка и тестирование прототипов.
4. Внедрение системы и обучение персонала.
5. Оценка эффективности и корректировка.
6. Постоянное совершенствование системы.

Процесс требует значительных финансовых и временных инвестиций, поэтому необходим предварительный анализ экономической целесообразности.

#### Экономический эффект

Ориентировочные показатели эффективности внедрения ИИ:

- **Сокращение трудозатрат:** уменьшение времени на создание дизайна с 100 до 20–30 человеко-часов, экономия до 262 500 RUB на изделие.
- **Уменьшение количества прототипов:** сокращение с 3–5 до 1–2 прототипов, экономия до 80 000 RUB на изделие.
- **Повышение коэффициента принятия клиентом:** рост с 70% до 85–90%.
- **Срок окупаемости инвестиций:** при объёме производства 200 изделий в год и инвестициях 100 000–150 000 USD — 12–18 месяцев.

#### Выводы

Интеграция ИИ в 3D-моделирование ювелирных изделий является стратегическим ресурсом для оптимизации производства. Ключевые преимущества:

1. Автоматизация и ускорение рутинных операций за счёт генеративных алгоритмов.
2. Повышение точности и минимизация ошибок на ранних этапах проектирования.

3. Гиперперсонализация и адаптивность под индивидуальные запросы клиентов.

Перспективными направлениями для дальнейших исследований являются разработка специализированных легковесных архитектур ИИ и преодоление технологических барьеров для массового внедрения. Внедрение ИИ позволит ювелирной отрасли достичь нового уровня эффективности, креативности и удовлетворения потребительского спроса.

#### Список литературы

1. Kazachkova O. A., Zybneva O. A., Mamedova I. Y., Kulishova E. A. 3D Technologies in the Production of Jewelry with Elements of Complicated Design. // International Journal of Engineering & Technology, 2018. - 7 (3.19).
2. Bingwen Duan. Analysis on the Value of 3D Printing in Jewelry Design Based on Artificial Intelligence. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – P. 1744.
3. Zirong Wang, Run Li. Automatic Optimization Algorithm of Jewelry Design based on Machine Vision // Computer-Aided Design & Applications. – 2024. - 21(S15). - P. 85-102.
4. Nikolaos Efkolidis, Prodromos Minaoglou, Kyriaki Aidinli, Panagiotis Kyratsis. Computational design used for jewelry // University of Western Macedonia, Department of Product and Systems Design Engineering, Kozani. 2020. – P. 1-7.
5. Bensa Regassa Hunde, Abraham Debebe Woldeyohannes. Future prospects of computer-aided design (CAD) – A review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. // Addis Ababa Science and Technology University, College of Electrical and Mechanical Engineering. Results in Engineering.- 2022. – P. 14.
6. А.Э. Бураева. Исследование аспектов применения искусственного интеллекта в цифровом производстве ювелирных изделий // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten. - 2016. - №. 6. - С. 369–380.
7. П. И. Балтрукович, М. Прудник. Интеграция технологий искусственного интеллекта в промышленные системы для создания оптимальной производственной среды. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники // Вестник связи. -2025. – С. 1-3.
8. Сопина, Н. В. Перспективы внедрения нейросетей и искусственного интеллекта на промышленном производстве / Н. В. Сопина, С.-А. Р. Маккаева // Journal of Monetary Economics. - 2023, № 3. - P. 222-227.
9. Соломинский А.В., Железин В.А., Миргородский А.Д., Краснобаев С.В., Колотилина Н.М. Внедрение искусственного интеллекта в средства автоматизации // Отдел гарантийного обслуживания, Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Рубин», г. Пенза. - С. 1-4.

УДК 519.876.5

Узбеков Р.Ш., Челноков В.В., Аверина Ю.М., Ли Сяовень

## Повышение энерго-ресурсоэффективности крупнотоннажных криогенных производств: проблемы и современные методы оптимизации

Узбеков Руслан Шавкятъевич – аспирант кафедры Логистики и Экономической Информатики;  
[uzbekovruslan01@yandex.ru](mailto:uzbekovruslan01@yandex.ru)

Челноков Виталий Вячеславович – д.т.н., профессор кафедры Логистики и Экономической Информатики;  
Аверина Юлия Михайловна – к.т.н., заведующий кафедрой Логистики и Экономической Информатики;  
Ли Сяовень – магистрант кафедры Логистики и Экономической Информатики.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

*В статье рассмотрены крупнотоннажные криогенные производства, которые являются основным источником получения кислорода, азота и аргона высокой чистоты. Данные производства характеризуются исключительно высокой энергоёмкостью, а их оптимизация приоритетной задачей специалистов этой области. В условиях ужесточения экологических норм, экономической нестабильностью рынка задача сквозной многоуровневой оптимизации таких сложным химико-технологических систем становится критически важным, приоритетным направлением развития для сохранения конкурентоспособности предприятия. Статья посвящена анализу проблем и методов оптимизации таких производств с акцентом на нелинейную природу технологических процессов.*

*Ключевые слова:* криогенные производства, энерго-ресурсосбережение, нелинейная оптимизация, математическое моделирование, ректификация, стохастическая оптимизация, детерминированная оптимизация, метод внутренних точек, генетические алгоритмы.

### Improving the energy efficiency of large-capacity cryogenic industries: problems and modern optimization methods

Uzbekov R.Sh.<sup>1</sup>, Chelnokov V.V.<sup>1</sup>, Averina Yu.M.<sup>1</sup>, Li Xiaowen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses large-capacity cryogenic production facilities, which are the main source of high-purity oxygen, nitrogen and argon. These productions are characterized by exceptionally high energy intensity, and their optimization is a priority task for specialists in this field. In the context of stricter environmental regulations and economic instability of the market, the task of end-to-end multilevel optimization of such complex chemical technology systems is becoming a critically important priority area of development for maintaining the competitiveness of the enterprise. The article is devoted to the analysis of problems and methods of optimization of such productions with an emphasis on the nonlinear nature of technological processes.*

*Key words:* cryogenic production, energy and resource extraction, nonlinear optimization, mathematical modeling, rectification, stochastic optimization, deterministic optimization, inner point method, genetic algorithms.

#### Введение

Криогенный процесс получения чистых газов методом низкотемпературной ректификации является одной из самых энергоёмких процессов химической технологии. Для получения 1 м<sup>3</sup> жидкого кислорода необходимо затратить порядка 3 кВт\*ч энергии, а для получения жидкого гелия в десять раз больше. Годовое энергопотребление таких крупнотоннажных предприятий можно сопоставить с энергопотреблением небольшого города. Вследствие этого снижение себестоимости продукции путем оптимизации химико-технологической системы (далее ХТС) делает задачу повышения энерго-ресурсоэффективности стратегически важным направлением развития.

Современные криогенные установки представляют собой сложные многосвязные системы, построенные по принципу каскада, изменение параметров одной установки влечет за собой нелинейную ответную реакцию в сопутствующих. В следствии этого традиционные методы поиска глобального оптимума часто оказываются неспособны учесть комплексное взаимовлияние

изменения параметров и найти глобальное оптимальное решение целевой функции, так как задача является многоуровневой с высокой степенью неопределённости.

В связи с этим применение современных методов нелинейной математической оптимизации становится новым трендом развития оптимизации ХТС. Особый интерес представляют два принципиально различных класса алгоритмов: стохастические, к ним относятся генетические алгоритмы и детерминированные методы, в частности, метод внутренних точек, которые и будут рассмотрены в данной статье в контексте оптимизации энерго-ресурсоэффективности крупнотоннажных криогенных производств.

#### Результаты и обсуждение

Криогенное производства представляет собой процесс ректификации газов при очень низких температурах. Основными газами являются азот (N<sub>2</sub>), аргон (Ar), кислород (O<sub>2</sub>), температуры кипения соответственно: -195,8°С, -185,9°С, -183,0°С [1]. На рисунке 1 представлена общая химико-технологическая система дистилляции воздуха.

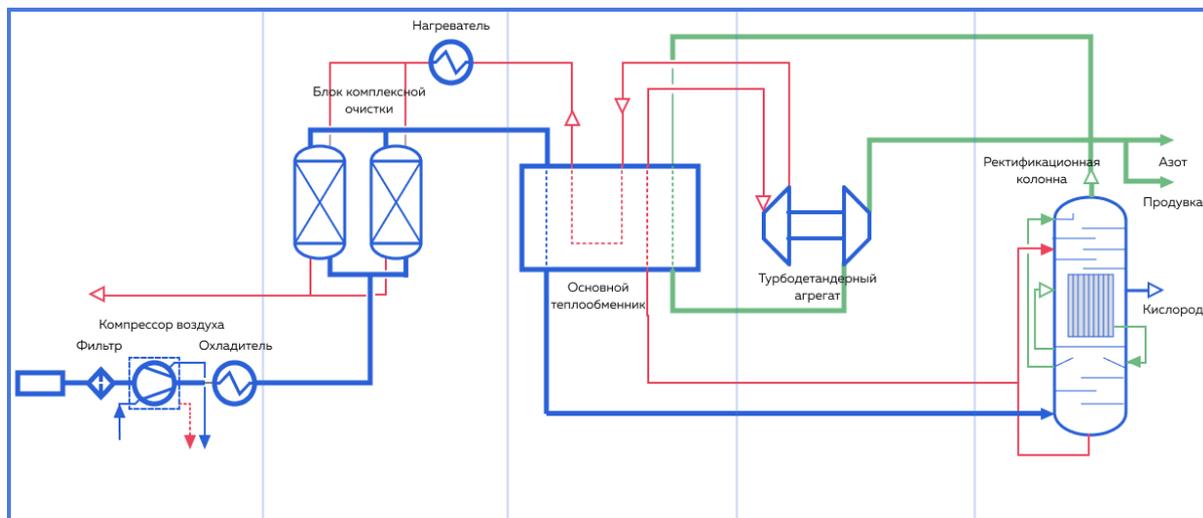


Рис. 1. Общая химико-технологическая схема дистилляции воздуха.

Процесс криогенного разделения воздуха можно разделить на несколько этапов.

1. Подготовительный этап. На данном этапе происходит несколько действий, а именно: сжатие сырья в компрессорах до высокого давления; осушение и очистка сжатого воздуха от не нужных газов и частиц; охлаждение до температуры сжижения.

2. Переходный этап. После зоны подготовки охлаждённая смесь газов под высоким давлением (5-6 бар) подается в середину колонны высокого давления (далее КВД).

3. Процесс работы КВД. Колонна высокого давления представляет из себя классический пример разделения смеси веществ благодаря их различию в температуре кипения, она служит для первоначального разделения воздуха на азот и обогащенную кислородом жидкость. При поступлении сырья в КВД, воздух попадает на тарелку, часть богатая азотом поднимается вверх по колонне, тяжелокипящая жидкость богатая кислородом стекает вниз колонны. Концентрация азота вверху колонны достигает 99.9%, концентрация кислорода 30-40%.

4. Переходный этап. На данном этапе происходит резкое снижение давления, что в свою очередь приводит к мгновенному испарению части жидкости и переходу образовавшейся парожидкостной смеси в середину верхней колонны.

5. Процесс работы колонны низкого давления (КНД). КНД предназначена для финального разделения кубовой жидкости на чистый кислород, азот и аргон. Механизм работы КНД аналогичен принципу работы колонны высокого давления: высококипящий пар поднимается вверх по колонне, тем самым увеличивается концентрация азота и достигает 99,99%, вниз в качестве кубовой жидкости стекает кислород и концентрируется до 99.5-99.8%.

6. Завершающий этап. Процесс подготовки и отгрузки готового продукта осуществляется различными способами в зависимости от предпочтений заказчика.

В химико-технологическом процессе также используются несколько теплообменников, основной (противоток) рекуперировать тепло с верха и куба КНД, тем самым минимизируя экономические затраты.

Особенность данной ХТС в контексте математического построения и глобальной многоуровневой оптимизации заключается в нелинейности различных процессов, соединённых между собой, что в свою очередь порождает ещё большее количество параметров неопределённости процесса.

Процесс криогенного разделения воздуха один из самых энергозатратных. Основные элементы энергопотребления и доля их распределения в общей ХТС представлена на рисунке 2 [2].



Рис. 2. Распределение энергозатрат в криогенном производстве, %.

Энергоресурсоэффективность в процессе разделения воздуха является сверхкритической задачей, поскольку криогенная дистилляция является очень энергоемким процессом. В следствии этого регулярное повышение энергоресурсоэффективности производственных мощностей и сокращение эксплуатационных расходов, является важным аспектом для снижения антропогенного влияния крупнотоннажной химической промышленности, и повышения конкурентоспособности предприятия. Классическими методами оптимизации ХТС являются изменение режимных параметров, катализаторов, режимов работы – это технологический уровень, на котором происходят изменения в самой сути технологического процесса, также к ним можно отнести аппаратный уровень оптимизации. В данном случаи акцент смещается на используемое оборудование, а именно модернизация оборудования, теплообменных сетей на более эффективные аппараты.

Альтернативным методом модернизации криогенной ректификации воздуха является оптимизация систем управления процессом. Данный уровень интеллектуального управления имеет сложный алгоритм, который анализирует данные ХТС и корректирует его параметры в реальном времени. Современные системы управления существенно снижают энергопотребление предприятий, сохраняя высокое качество продукта, что указывает на большой потенциал для снижения затрат процессов криогенного производства [3].

*Гибридное применение стохастических и детерминантных методов оптимизации ХТС.*

Специфика стохастических методов оптимизации делает их применимыми для нетривиальных задач оптимизации, поскольку для каждой задачи скорость определения глобального экстремума, сходимости, влияние различных факторов на параметры системы требует тщательной проработки.

К стохастическим методам оптимизации относятся природоподобный метод, основанный на идеи моделирования эволюционных процессы - это генетические алгоритмы. Целью данного метода является решение сложной комбинаторной задачи.

Детерминированная оптимизация – это алгоритмы, основанные известных математических свойствах функции: дифференцируемости, монотонности и т.д. К этому классу относится метод внутренних точек. К методу внутренних точек относятся численные алгоритмы решения задач оптимизации, ключевой особенностью которых является то, что все промежуточные точки (итерации) алгоритма строго удовлетворяют ограничениям-неравенствам, то есть лежат внутри допустимой области, а не на её границе [4].

Современные тренды развития и жесткое давление на ХТС породило новый виток развития оптимизационных методов. Одной из быстроразвивающихся стал гибридный

(меметический) метод оптимизации. Частным случаем является совместное использование генетических алгоритмов и метода внутренних точек. Генетический алгоритм в данном случае применяется для грубого поиска начальных решений, а метод внутренних точек используется для решения поставленной задачи оптимизации[5].

Методология гибридизации двух совершенно противоположных решений создает универсальное решение задач оптимизации, стохастическая (генетический алгоритм) оптимизация выполняет функцию глобального поиска, а детерминированный метод (метод внутренних точек) играет роль локального решения целевой функции, блок-схема гибридного метода оптимизации параметров ХТС представлена на рисунке 3. В данной блок-схеме представлен гибридный принцип нахождения оптимального решения, где генетический алгоритм решает задачу широкомасштабного поиска в пространстве параметров, находя более оптимальные области, которые содержат потенциально применимые решения [6-7].

Далее оптимальные области обрабатываются методом внутренних точек, в следствии этого происходит быстрое и точное нахождение оптимального значения заданной функции. В результате преодолевается основная проблема генетических алгоритмов большой разброс параметров (локальная сходимости), а для метода внутренних точек это проблему зависимости от начального приближения.

Разработанный гибридный алгоритм, представленный на рисунке 3 объединяет эволюционные принципы с локальным обучением. Для оптимизации параметров криогенного разделения воздуха, где целевая функция объединяет в себя капитальные, энергетические, эксплуатационные затраты и ограничения к чистоте продукта, давлению, влиянию внешних факторов рынка и погодных условия, как следствием является огромное количество параметров, влияющих на систему в целом, при решении данной задачи гибридный подход проявляет особую эффективность. Генетический алгоритм исследует многомерное пространство параметров системы выявляя пространство с экономически перспективными конфигурациями, затем метод внутренних точек осуществляет локальный поиск, обеспечивая соблюдение представленных ограничений системы, в следствии этого достигается минимальная чистота кислорода и азота достигает соответственно 99.6% и 99.99% в минимальных экономических затратах.

С вычислительной точки зрения моделирование криогенного разделения воздуха требует значительных ресурсов, но выборочное применение метода внутренних точек благодаря генетическому алгоритму способствует значительному сокращению вычислительных ресурсов в следствии этого достигается оптимальное решения целевой функции.

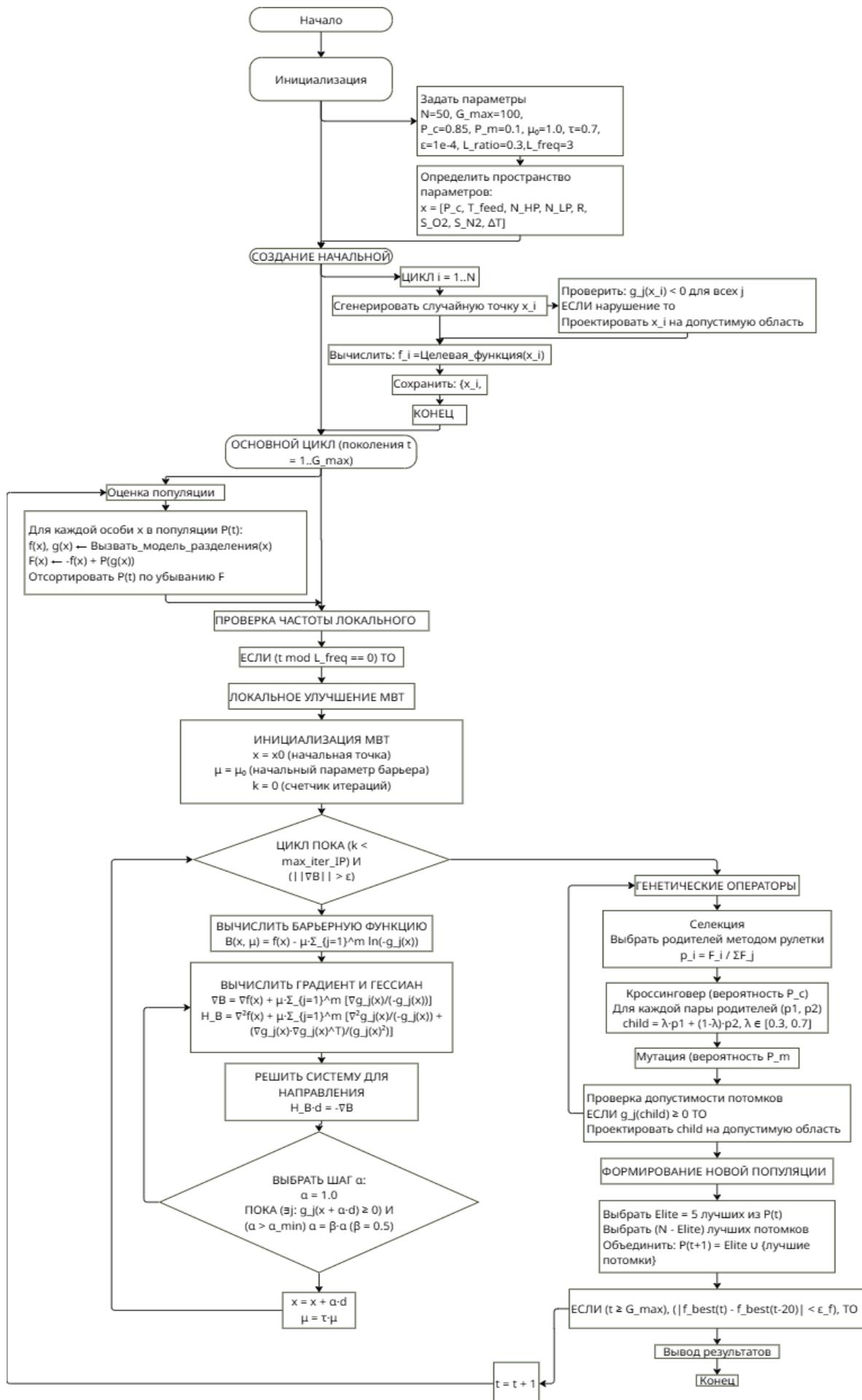


Рис. 3. Блок-схема гибридного метода оптимизации параметров ХТС

### Заключение

Гибридный (меметический) метод оптимизации ХТС, основанный на применении генетических алгоритмов и метода внутренних точек представляет собой обоснованный и эффективный подход решения задач многоуровневой оптимизации с многочисленными ограничениями. В контексте оптимизации процесса криогенного разделения воздуха этот подход позволяет найти экономически оптимальное решение поставленной задачи, обеспечивая требуемое качество продукции при минимальных затратах и соблюдении технологических органических производства.

### Список литературы

1. Oil Gas, J. (2017). Nitrogen, Oxygen, and Argon Production. Encyclopedia of Chemical Processing and Design: Volume 31-Natural Gas Liquids and Natural Gasoline to Offshore Process Piping: High Performance Alloys, 205.

2. Qiao, S., Xu, M., Lv, X., Zhao, H. Analysis and Optimization of Cryogenic Distillation Systems: For Reducing Distillation Energy Consumption // Chemical Engineering & Technology. - 2025. - №48(1). - P. e202400296

3. 76-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета [Электронный ресурс] : материалы конф. В 3 ч. Ч. 1, Минск, 13–24 мая 2019 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. Г. Сафонов (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2019. – С. 56-59.

4. Дмитриев С. В., Тененев В. А. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью гибридных генетических алгоритмов // Известия Института математики и информатики. - 2006. - №2(36). - С. 163-166.

5. Hansknecht, C., Kirches, C. SLEQP: An open-source package for nonlinear programming // PAMM. - 2023. - №23(4). - С. e202300241.

6. Toktas, O. L., Nguyen, Q. M., Onur, M. Comparison of Constrained Life Cycle Production Optimization Algorithms Based on Stochastic Simplex Approximate Gradients // SPE Journal. - 2025. - №30(03). - С. 1413-1431.

7. Zhuang, Z., Tao, H., Chen, Y., Stojanovic, V., Paszke, W. An optimal iterative learning control approach for linear systems with nonuniform trial lengths under input constraints // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. - 2022. - №53(6). - С. 3461-3473.

УДК 544.723.212

Мирзоева П.А., Смирнова С.С., Маркова Е.Б.

**Корреляция между свойствами поверхности и каталитической активностью ванадатов редкоземельных элементов при крекинге пропана**

Мирзоева П.А., бакалавр кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
Смирнова С.С., аспирант кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
Маркова Е.Б., кандидат химических наук, доцент кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В представленной работе объектом изучения выступила каталитическая активность редкоземельных ванадатов (Dy, Eu, Ho) в реакции крекинга пропана. Катализаторы получены методом твердофазного синтеза. Исследование процесса проводили в проточном реакторе в интервале температур 623–1023 °С с последующим хроматографическим анализом продуктовой смеси. Каталитические свойства оценивали на основе степени превращения пропана, селективности по целевым олефинам (этилену и пропилену). Кислотность поверхности определяли по методу Гаммета–Танабе. Установлено, что природа редкоземельного элемента в структуре ванадата существенно влияет на текстуру, кислотные свойства катализатора и, как результат, на его активность и селективность в крекинге. Полученные выводы свидетельствуют о высоком потенциале применения редкоземельных ванадатов, в том числе полученных из техногенного сырья, в качестве катализаторов для процессов нефтепереработки и нефтехимии.*

**Ключевые слова:** крекинг пропана, редкоземельные ванадаты, твердофазный синтез, кислотность поверхности, каталитическая активность.

**CORRELATION BETWEEN SURFACE PROPERTIES AND THE CATALYTIC ACTIVITY OF RARE EARTH VANADATES IN THE CRACKING OF PROPANE**

Mirzoeva P.A., Smirnova S.S., Markova E.B.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*This study focuses on the catalytic activity of rare-earth vanadates (Dy, Eu, Ho) in the propane cracking reaction. The catalysts were synthesized via solid-state reaction. The catalytic process was investigated in a flow reactor over a temperature range of 623–1023 K, followed by chromatographic analysis of the product mixture. Catalytic performance was assessed based on propane conversion and selectivity toward target olefins—ethylene and propylene. Surface acidity was evaluated using the Hammett–Tanabe indicator method. It was established that the nature of the rare-earth cation in the vanadate structure significantly affects the catalyst's textural and acidic properties, consequently influencing its activity and selectivity in propane cracking. The findings underscore the high potential of rare-earth vanadates—particularly those derived from technogenic feedstocks—as catalysts for petroleum refining and petrochemical applications.*

**Keywords:** propane cracking, rare-earth vanadates, solid-state synthesis, surface acidity, catalytic activity.

**Введение**

В России проблема утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) остается крайне актуальной. Несмотря на высокую ценность этого ресурса, значительная его часть до сих пор сжигается, что наносит существенный экологический ущерб и приводит к значительным экономическим потерям.

В последние годы вопрос рационального использования ПНГ активно обсуждается в научных и промышленных кругах. Это связано с тем, что его переработка открывает новые перспективы для нефтехимической отрасли. В частности, увеличение объемов перерабатываемого ПНГ позволит обеспечить прирост производства легкого углеводородного сырья, крайне востребованного в нефтехимии. В этом контексте особую актуальность приобретают технологии эффективной утилизации ПНГ, такие как каталитический крекинг.

Каталитический крекинг легких алканов, входящих в состав ПНГ (преимущественно пропана), является ключевым процессом современной

нефтехимии, позволяющим получать ценные олефины - пропилен и этилен. В условиях растущего спроса на эти продукты особое значение приобретает разработка высокоэффективных катализаторов, обладающих оптимальными характеристиками активности, селективности и стабильности [1].

Среди перспективных катализаторов особого внимания заслуживают ванадаты редкоземельных элементов (РЗЭ). Их уникальное сочетание кислотно-основных и редокс-свойств обеспечивает высокую каталитическую активность, при этом поверхностные характеристики этих материалов играют определяющую роль в их каталитическом поведении. При этом до сих пор остаются недостаточно изученными зависимости между составом, структурой и каталитическими свойствами РЗЭ-ванадатов в условиях крекинга. Оптимизация этих параметров может привести к созданию более эффективных каталитических систем, способных работать в промышленных условиях с минимальными энергозатратами [2,3].

### Экспериментальная часть

Для исследования каталитической активности ванадатов редкоземельных металлов были получены образцы методом твердофазного синтеза по схеме, представленной ниже (рис. 1).

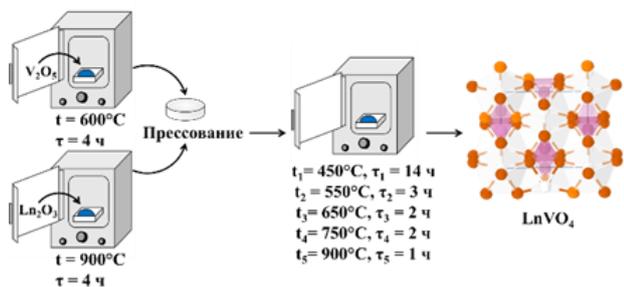


Рис. 1. Схема получения ванадатов РЗМ ( $LnVO_4$  ( $Ln = Eu, Dy, Ho$ ))

Каталитический крекинг пропана проводился в диапазоне температур 100-900 °С с шагом 50 °С на стендовой установке с проточным реактором (см. рисунок 2). Реакцию в каждой из температур отслеживали с помощью хроматографа "Кристалл 5000М" (Йошкар-Ола, Россия), оснащенного пламенно-ионизационным детектором и детектором по теплопроводности.

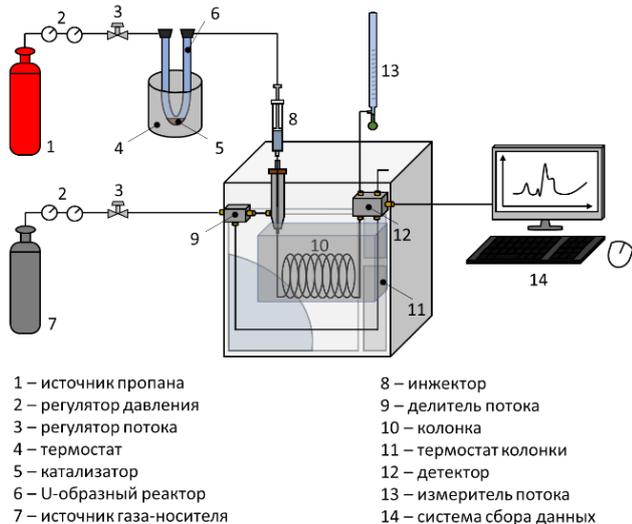


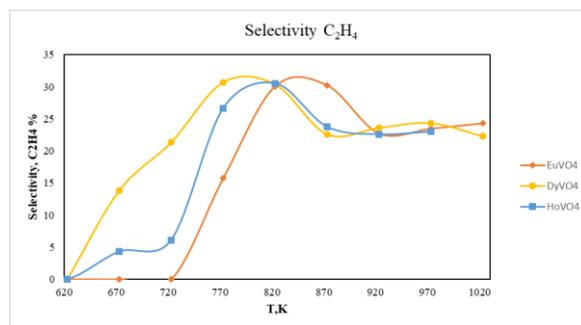
Рис. 2. Схема каталитической установки

В качестве инертного газа-носителя использовался аргон.

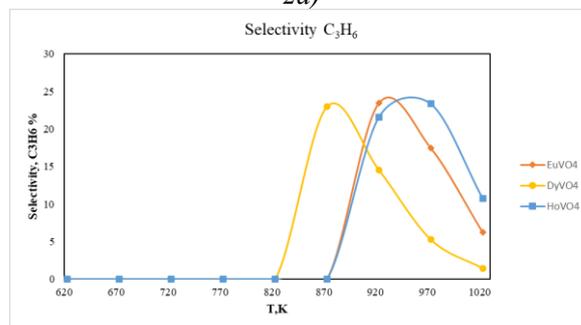
Карбеновая селективность вычислена по формуле:

$$S_{carbon}(x) = \frac{\frac{a_i}{3} \times n_{i_{вых}}}{n_{C_3H_8_{вход}} - n_{C_3H_8_{вых}}} \times 100\%$$

где  $a_i$ , - число атомов углерода в продукте (i),  $n_{i_{вых}}$  - молярный поток продукта (i) на выходе из реактора,  $n_{C_3H_8_{вход}}$  и  $n_{C_3H_8_{вых}}$  - молярный поток  $C_3H_8$  на входе в реактор и молярный поток  $C_3H_8$  на выходе из реактора. Температурные зависимости селективности в процессе крекинга пропана на разных ванадатных катализаторах представлены на рисунке 2а, 2б



2а)



2б)

Рис. 2 Температурные зависимости селективности: (а) - по этилену, (б) – по пропилену в присутствии разных ванадатных катализаторов

Распределение центров поверхности по кислотно-основным свойствам определяли индикаторным методом Гаммета и Танабе с использованием 6 индикаторов со значениями  $pK_a$  в интервале от 3,56 до 14,1.

Количество центров адсорбции данной кислотной силы  $q_{pK_a}$ , эквивалентную количеству адсорбированного красителя, определяли в моль/г.

$$|q_{pK_a} = \frac{C_{ind} V_{ind}}{A_0} \left( \left| \frac{A_0 - A_1}{m_1} \pm \frac{A_0 - A_2}{m_2} \right| \right)|$$

где  $C_{ind}$  – концентрация раствора индикатора, мг-моль/мл;

$V_{ind}$  – объем раствора индикатора, взятого для анализа, мл;

$A_0$  – оптическая плотность раствора индикатора до сорбции;

$A_1$  – оптическая плотность раствора индикатора после сорбции;

$A_2$  – оптическая плотность «холостого» раствора.

Знак «-» соответствует однонаправленному изменению  $A_1$  и  $A_2$  относительно  $A_0$ , т.е.  $A_1$  и  $A_2 < A_0$  или  $A_1 > A_0$  и  $A_2 > A_0$ .

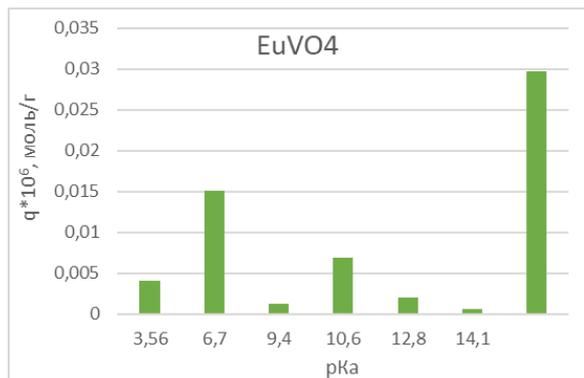
Знак «+» соответствует разнонаправленному изменению  $A_1$  и  $A_2$  относительно  $A_0$ , т.е.  $A_1 > A_0$ ,  $A_2 < A_0$  или  $A_1 < A_0$  и  $A_2 > A_0$ .

На основании полученных данных строили кривую распределения кислотно-основных центров на поверхности исследуемого образца в координатах

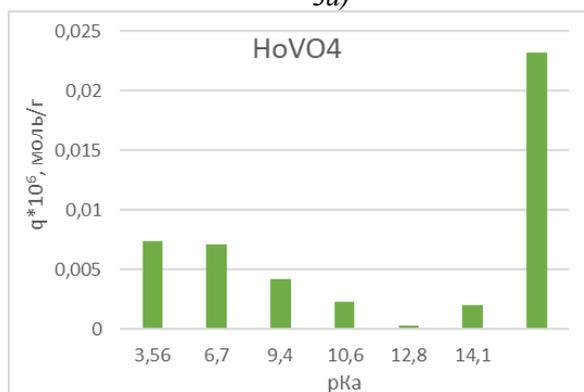
$$q_{pK_a} = f(pK_a),$$

где  $pK_a = -\lg K_a$  – показатель кислотности, характеризующий кислотную силу индикаторов, являющихся слабыми кислотами или основаниями.

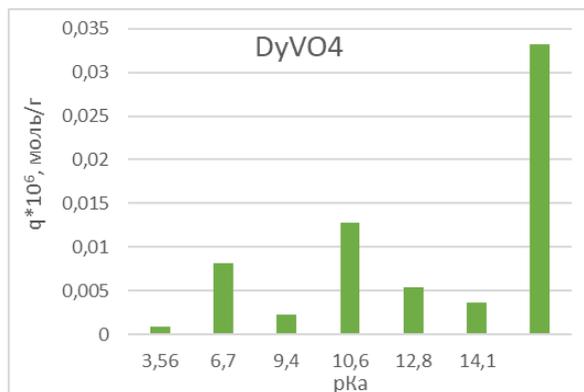
Результаты анализа представлены на рисунке 3а, 3б, 3в



3а)



3б)



3в)

Рис. 3 Кривые распределения кислотно-основных центров на поверхности исследуемых ванадатов

Были построены диаграммы сравнения зависимости показателей кислотности и суммарных кислотностей для образцов на разных красителях, результаты представлены на рисунке 4а, 4б



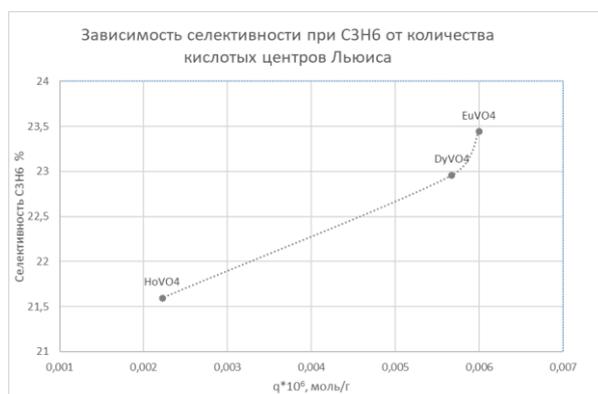
4а)



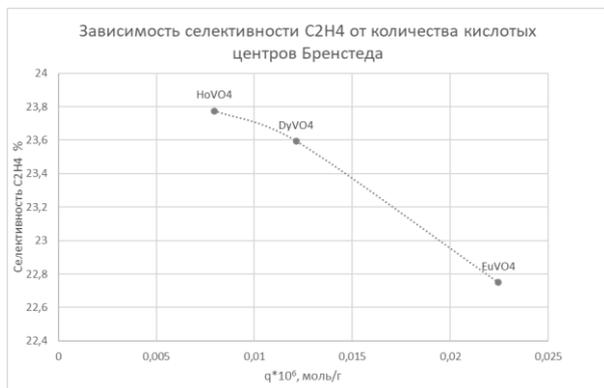
4б)

Рис. 4. Диаграммы, зависимой показателей кислотности и суммарных показателей кислотностей ванадатов у разных красителей

В результате была определена зависимость селективности ванадатов по целевым продуктам – пропилену и этилену от количества кислотных центров Льюиса и Бренстеда соответственно, результаты представлены на рисунках 5а, 5б



5а)



5б)

**Рисунок 5** Зависимость селективности ванадатных катализаторов при (а) C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> от суммы кислотных центров Льюиса, (б) C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> от суммы кислотных центров Бренстеда

### Обсуждение результатов

Экспериментальные результаты исследования демонстрирует различный вклад кислотных центров Льюиса и Бренстеда в каталитические свойства ванадатов редкоземельных элементов LnVO<sub>4</sub> (Ln = Ho, Dy, Eu) в реакциях дегидрирования пропана. Выявленные закономерности указывают на специфичность механизмов активации пропана, определяемую природой кислотных сайтов.

Для реакции пропана в пропилен наблюдается четкая положительная линейная корреляция между селективностью и концентрацией кислотных центров Льюиса. Эта однозначная зависимость позволяет утверждать, что именно данные центры, представленные координационно-ненасыщенными катионами Ln<sup>3+</sup>/V<sup>5+</sup>, являются первичными и селективными активными сайтами. Их функция как акцепторов электронной плотности заключается в направленной поляризации и гетеролитическом разрыве C–H связи пропана. Линейный характер роста селективности свидетельствует о том, что увеличение числа сайтов Льюиса сопровождается нежелательными реакциями.

Зависимость селективности от концентрации кислотных центров Бренстеда носит слабовыраженный нелинейный характер, что является индикатором сложного, опосредованного влияния. Такой тип корреляции характерен для систем, где наблюдаемый параметр проходит через

максимум при изменении фактора влияния. Можно предположить, что протонодонорные центры в умеренном количестве участвуют в активации молекулы этана, однако их избыток способствует прочному связыванию и последующему неселективному превращению этилена в продукты полного окисления. Таким образом, кислотность Бренстеда требует строгой оптимизации и должна рассматриваться в комплексе с другими характеристиками катализатора, прежде всего с его редокс-свойствами.

### Заключение

Проведённое исследование оксидов лантаноидов LnVO<sub>4</sub> (Ln = Ho, Dy, Eu) в реакциях дегидрирования алканов выявило существенные различия в роли кислотных центров в зависимости от структуры реагента. В случае перехода пропана в пропилен наблюдалась чёткая линейная корреляция между селективностью процесса и концентрацией кислотных центров Льюиса, что свидетельствует об их определяющей функции в селективной активации C–H связи пропана. Напротив, при переходе этилен влияние кислотных центров Бренстеда нелинейным, что указывает на вероятное участие в побочных реакциях и конкуренции с коксованием. Полученные данные подчёркивают необходимость дифференцированного подхода к проектированию катализаторов: оптимизация кислотных свойств должна учитывать как природу активных центров (Льюиса или Бренстеда), так и специфику целевой алкановой реакции.

### Список литературы

1. Коржубаев А., Ламерт Д., Эдер Л. Проблемы и перспективы эффективного использования попутного нефтяного газа в России // Бурение и нефть. — 2012. - №04. - С. 4-7.
2. Fushan Feng, Haiyuan Zhang, Shaoqi Chu, Qinqin Zhang, Chao Wang, Guangjian Wang, Fang Wang, Liancheng Bing, Dezhi Han. Recent progress on the traditional and emerging catalysts for propane dehydrogenation // Elsevier, 2023.
3. Chen S. et al. Propane dehydrogenation: catalyst development, new chemistry, and emerging technologies // Chemical Society Reviews. – 2021. – Т. 50. – №. 5. – С. 3315-3354
4. Vora, B.V. Development of Dehydrogenation Catalysts and Processes. Top. Catal. 2012, 55, 1297–1308.

УДК 665.7.038

Пронина Т.В., Зверева О.В.

### Сравнительный анализ патентов по методам переработки отработанных масел

Пронина Таисия Викторовна – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики;  
Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,  
zvereva.o.v@muctr.ru;  
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*Данная статья посвящена изучению технологий переработки отработанных масел. Исследование охватывает принципы переработки, ключевые особенности, а также включает обзор различного оборудования для переработки и перспективы развития технологии. Был проведен теоретический анализ и сравнение принципов переработки отработанных масел.*

*Ключевые слова: переработка отработанных масел, отработанные смазочные масла, методы регенерации, восстановление качества масла.*

### Comparative review of patents in the field of used oil recycling

Pronina T.V., Zvereva O.V.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*This article is devoted to the study of waste oil recycling technologies. The research covers the principles of recycling, key features, and also includes a review of various recycling equipment and prospects for the technology's development. A theoretical analysis and comparison of waste oil recycling principles were conducted.*

*Keywords: waste oil recycling, used lubricating oils, regeneration methods, oil quality restoration.*

#### Введение

Отработанные смазочные материалы в настоящее время являются одним из основных видов техногенных отходов, оказывающих крайне негативное воздействие на окружающую среду - атмосферу, почву и воду. Около 30% смазочных материалов безвозвратно теряется в процессе эксплуатации оборудования. Оставшаяся часть претерпевает серьезные изменения под влиянием условий эксплуатации и подлежит снятию с техники. Несмотря на то, что отработанные смазочные материалы представляют значительную опасность для окружающей среды (полихлорированные бифенилы, сложные эфиры фосфорной кислоты, алкилбензолы), они представляют собой ценный вторичный запас, и их необходимо собирать и утилизировать.

Регенерация предполагает восстановление качества смазки до уровня, сопоставимого с исходным. Современные схемы регенерации отработанных моторных масел, применяемые в развитых странах, включают физические и физико-химические процессы - коагуляцию, очистку серной кислоты и адсорбционную очистку синтетическими или природными сорбентами (бентонитами, глинами [1]. Сейчас актуальной задачей является разработка и усовершенствование методов переработки отработанных масел. В данной статье будут рассмотрены методы переработки отработанных масел, то есть технологии регенерации масел и сравнение качества восстановленного масла, энергозатрат и экологического эффекта.

#### Аналитическая часть

В патенте [2] раскрывается метод

восстановления отработанных нефтяных масел с помощью экстракции органическими растворителями. Данная технология направлена на регенерацию отходов с целью получения базовых компонентов для смазочных материалов. Если описать процесс кратко, то после стадии экстрагирования и отгонки алифатического растворителя выполняют два ключевых этапа. Сначала осуществляется однократное непрерывное испарение при атмосферном или близком к нему давлении. Эта операция позволяет удалить легкие углеводороды, причем процесс ведут с добавлением малых количеств основного или восстанавливающего реагента (либо их смеси). Затем донную жидкость от первой стадии направляют на непрерывную ректификацию в колонне. Дистилляцию проводят под умеренным вакуумом и при щадящих температурах, также в присутствии упомянутых реагентов. Особенностью метода является рециркуляция остатка со дна колонны назад в исходное сырье. В итоге из аппарата выводят несколько полезных продуктов: вакуумный газойль (или веретенное масло), фракции базовых масел (боковые отборы), а также котельное топливо или асфальтовый компонент в виде кубового остатка.

Главными достижениями способа считаются существенное улучшение цвета очищенного масла (до 1.5–3.0 по ASTM D 500) и снижение кислотного числа до 0.1 мг КОН/г. Однако у технологии есть и очевидные минусы. Для получения указанных результатов приходится применять дополнительные химические реагенты, создавать вакуум и выстраивать многостадийный процесс, что усложняет всю схему. К общим для подобных методик

признакам можно отнести предварительный нагрев сырья, экстракцию растворителями и организацию рециркуляции части продуктов.

В качестве другого известного решения можно рассмотреть более ранний патент [3]. В нём также предлагается комплексная переработка отработанных масел. Последовательность операций включает: нагрев для удаления воды и лёгких фракций, экстракцию насыщенными углеводородными растворителями (в частности, пропаном), последующую вакуумную разгонку с разделением на фракции и финишную гидроочистку. Примечательно, что тяжёлую фракцию после дистилляции дополнительно подвергают термообработке и повторной экстракции. Что касается режимов первой экстракции, то температура может варьироваться от 30°C до критической температуры пропана, а давление — находиться в интервале 25–50 кгс/см<sup>2</sup>.

Интересной особенностью этого способа является возврат остатка от второй пропановой экстракции в колонну первой экстракционной ступени. Авторы отмечают, что однократная экстракция с использованием нормальных парафиновых углеводородов часто не позволяет достичь высокой степени очистки — в масле остаётся заметное количество примесей. Таким образом, к общим признакам данного метода и аналогичных разработок относят: предварительный нагрев и обезвоживание масла, отгонку лёгких углеводородов, экстракцию ненасыщенным растворителем и возврат (рециркуляцию) частично очищенного продукта на предыдущие стадии.

В источнике [4] предложен метод

Таблица 1 – Показатели регенерации отработанного моторного масла

состава	Состав водного раствора			Количество водного раствора в об.% от объема отработанного масла	Показатели регенерации		
	Карбамид	Моноэтаноламин	Хлорид алюминия		Мехпримеси мас.%	Смоли, мас.%	Загрязненность, см <sup>-1</sup>
1	25	3	1	0,25	0,35	0,42	84
2	30	4	2	0,50	отс.	0,30	75
3	40	5	3	0,75	отс.	0,29	75
4	50	6	4	1,00	отс.	0,29	74
5	60	7	5	1,25	отс.	0,29	75

В ходе экспериментальной работы в качестве объекта исследования использовалось отработанное масло марки МС-8. Сравнительная оценка проводилась для двух методик регенерации. Первая (базовая) представляла собой известный метод, при котором в масло, предварительно нагретое до 80–100 °С, вводили 0,5–1,0% водного раствора карбамида концентрацией 30–50% с последующим отделением очищенного продукта. Вторая методика — это предлагаемый усовершенствованный способ. Результаты сравнительных испытаний обобщены в таблице 2. Их анализ позволяет сделать вывод, что новая технология регенерации действительно решает поставленные задачи и обеспечивает более высокую степень восстановления первоначальных эксплуатационных свойств отработанных масел.

В другом исследовании [5] анализировались образцы

регенерации, направленный на существенное улучшение качества восстановленного смазочного масла. Алгоритм процесса включает несколько последовательных операций. Сначала отработанное масло нагревают до диапазона 80–100 °С. Затем в него вводят водный раствор специально подобранного состава, который содержит (в мас. %): 30–50 карбамида, 4–6 моноэтаноламина и 2–4 хлорида алюминия. Дозировка этого раствора относительно невелика и составляет всего 0,5–1,0% от объёма перерабатываемого масла. Далее смесь выдерживают при рабочей температуре в течение часа, обеспечивая периодическое перемешивание. Завершающей стадией является механическое разделение — отделение выпавших загрязнений центрифугированием. Как показывают исследования, ключевая роль здесь отводится действию вводимого раствора, который работает как дестабилизатор коллоидной системы масла. Под его влиянием резко активизируются процессы коагуляции и последующей седиментации частиц дисперсной фазы.

Авторы работы [4] эмпирически установили, что именно указанные параметры (температура, время, состав и дозировка) позволяют достичь оптимального эффекта очистки от продуктов старения и посторонних включений. Было доказано, что снижение количества добавляемого раствора менее 0,5 об.% (вариант под условным названием «состав 1») закономерно ухудшает качество регенерации. В то же время превышение дозировки выше 1,0 об.% («состав 5») не даёт сколько-нибудь значимого прироста эффективности, что чётко видно из данных, представленных в Таблице 1.

конкретных отработанных моторных масел: Shell 5W-30 (класс API SL, ACEA A3/B4), Ecomobil 10W-40 (API SF/CD/CF) и Micking 5W-30 (API SN). Лабораторные данные показали, что их относительная плотность колеблется в интервале 0,832–0,863 г/см<sup>3</sup>. Содержание воды составило 0,01–0,06% по массе, а количество механических примесей — от 0,001 до 0,029%. Данные ИК-спектроскопии свидетельствуют о процессах деструкции, происходящих в маслах под воздействием высоких температур и механического трения. Параллельно с этим в условиях избытка кислорода протекает окисление углеводородной основы, что в итоге приводит к накоплению различных соединений, содержащих азот и кислород, а также других загрязняющих веществ.

Таблица 2 – Показатели регенерации отработанного моторного масла

№ п/п	Наименование показателя	Исходное отработанное масло	Регенерированное масло по способу прототипа	Регенерированное масло по предлагаемому способу
1	Вязкость кинематическая при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	12,1	11,5	11,0
2	Массовая доля механических примесей, %	2,7	0,01	Отс.
3	Массовая доля воды, %	1,5	0,30	Отс.
4	Температура вспышки в открытом тигле, °С	160	200	210
5	Температура застывания, °С	- 12	- 16	- 22
6	Щелочное число, мг КОН на 1 г масла	3,6	4,2	6,1

Ещё одним примером отечественной практики является установка УОМ-100. С её помощью удаётся повысить кинематическую вязкость очищенного масла до 9 мм<sup>2</sup>/с, при том, что на входе в установку (в исходном отработанном масле) этот параметр составляет не менее 8,5 мм<sup>2</sup>/с. Для сравнения: норматив по ГОСТ для свежего масла равен 10 мм<sup>2</sup>/с (при 100 °С). После обработки содержание механических примесей снижается до 0,01%, что уже соответствует требованиям стандарта. Количество нерастворимого осадка падает с 0,7% в исходном сырье до 0,02%. В результате масло или смесь масел после такой очистки может применяться в качестве гидравлического, а моторные масла от дизельных двигателей становятся пригодными для доливки в среднефорсированные моторы.

Отдельного внимания заслуживает компактная, но эффективная установка УОМ-3М от других российских разработчиков. Её габариты составляют всего 1200×900×1000 мм, при этом она способна снижать содержание механических примесей с 0,9% в загрязнённом масле до 0,01% в очищенном продукте. Примечательно, что по ГОСТ в свежем масле допускается не более 0,015% таких примесей. Производительность установки такова, что всего за один час из 100 литров отработанного масла получается 95–98 литров готового продукта. Технология обеспечивает полноценную очистку: удаление воды, осветление и освобождение от твёрдых частиц [6].

#### Заключение

На данный момент разработаны энергоэффективные и экономически рациональные технологии переработки отработанных масел, позволяющие перерабатывать сырье в малых объемах с различным содержанием легких и тяжелых компонентов. Переработка отработанных масел — это не только экологическая необходимость, но и перспективное направление для развития зеленых технологий и прибыльного бизнеса. Современные методы, такие как гидрогенизация и адсорбционная очистка, позволяют восстанавливать масла до их первоначального состояния, превращая их в качественные смазочные жидкости или топливо. Это снижает зависимость от природных ресурсов и способствует устойчивому развитию

промышленности. Инвестиции в переработку масел — стратегический шаг к устойчивому будущему, который объединяет экологическую ответственность и экономическую выгоду.

#### Список использованных источников

1. Чуденкова Т. Н., Чуденкова В. Н. Химия и технология регенерации отработанного моторного масла // Вестник науки и образования. – 2020. – №. 22-1 (100). – С. 10-14.
2. 2288946 Российская Федерация. Пат. 2288946 Российская Федерация, МПК С10G 21/00, С10M 175/00. Способ очистки отработанных масел экстракцией растворителями / Абрамов О. В., Багдасарян Р. С., Смирнов В. В.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "ГК "ЭКОС" (ООО "ГК "ЭКОС"). – № 2005123267/15; заявл. 03.11.2025; опубл. 10.12.2006, Бюл. № 34. – 8 с.
3. 2599782 Российская Федерация. Пат. 2599782 Российская Федерация, МПК С10M 175/00 (2024.01). Способ переработки отработанных смазочных материалов / Томин В. П., Мозилина О. Ю., Силинская Я. Н.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет" (ФГАОУ ВО "НИУ"). – № 2024101234/04; заявл. 20.01.2024; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – 8 с.
4. Баатарху Ц., Гордиенко Л. Д. Восстановление качества отработанных смазочных масел // Инновационная наука. 2015. №12-3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vosstanovlenie-kachestva-otrabotannyh-smazochnyh-masel> (дата обращения: 04.11.2025).
5. Сафаров Ж. А. У., Хайитов Р. Р. Исследование физико-химических свойств и химического состава отработанных моторных масел // Universum: технические науки. – 2021. – №. 6-4 (87). – С. 14-19.
6. Целесообразно ли восстановление отработанного масла? // Экскаватор.Ру. URL: [https://exkavator.ru/main/news/inf\\_news/10022\\_tselesoobrazno\\_li\\_vosstanovlenie\\_otrabotannogo\\_masla.html](https://exkavator.ru/main/news/inf_news/10022_tselesoobrazno_li_vosstanovlenie_otrabotannogo_masla.html) (дата обращения: 04.11.2025).

УДК 628.3

Сиючева В.Р., Сяо Вень Ли, Зверева О.В.

## Методологические основы выбора систем водоочистки для промышленных предприятий

Сиючева Валерия Рустановна – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики;  
Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,  
[zvereva.o.v@muctr.ru](mailto:zvereva.o.v@muctr.ru);

Сяо Вень Ли – магистр РХТУ;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье исследуется сложная задача выбора оптимальной системы водоочистки для промышленного предприятия, актуальность которой возрастает в условиях интенсификации производства и ужесточения экологических требований. Проведен сравнительный анализ существующих подходов, которые либо сосредоточены на водоподготовке для коммунальных нужд, либо решают частные отраслевые задачи очистки стоков, но не предлагают комплексных решений. В работе систематизированы ключевые факторы, определяющие выбор технологических схем: производственно-технологические характеристики предприятия, природно-климатические условия его локации и качественные показатели водных потоков с учетом их сезонной динамики. На основе анализа делается вывод о необходимости разработки обобщенной многокритериальной модели, способной интегрировать требования к очистке как входящей технической, так и исходящей сточной воды.*

*Ключевые слова: промышленное водопользование, очистка сточных вод, водоподготовка, выбор технологии очистки, качество воды*

## Methodological Foundations for Selecting Water Treatment Systems for Industrial Enterprises

Siucheva V.R., Wenli Xiao, Zvereva O.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia

*The article examines the complex task of selecting an optimal water treatment system for an industrial enterprise, the relevance of which is growing amid intensification of production and tightening environmental requirements. A comparative analysis of existing approaches is carried out, which are either focused on water treatment for municipal needs or solve specific industry-related wastewater treatment tasks but do not offer comprehensive solutions. The paper systematizes key factors determining the choice of technological schemes: production and technological characteristics of the enterprise, natural and climatic conditions of its location, and qualitative indicators of water flows taking into account their seasonal dynamics. Based on the analysis, it is concluded that there is a need to develop a generalized multicriteria model capable of integrating requirements for treating both incoming process water and outgoing wastewater.*

*Keywords: industrial water use, wastewater treatment, water treatment, treatment technology selection, water quality*

### Введение

Актуальность вопросов экологической безопасности промышленного производства в современных условиях не вызывает сомнений. Интенсификация промышленного роста, стимулируемая в том числе государственными программами импортозамещения в условиях внешних ограничений, закономерно ведет к возрастанию антропогенной нагрузки на окружающую среду в различных регионах Российской Федерации. В этой связи для производителей критически важной задачей становится строгий контроль параметров воздействия на все компоненты экосистемы: атмосферный воздух, водные объекты и почвы. Значительная доля негативного воздействия приходится на водную среду, что формирует для предприятия два взаимосвязанных технологических и экологических аспекта деятельности. Во-первых, существует задача обеспечения сброса очищенных сточных вод,

соответствующим установленным санитарно-эпидемиологическим и рыбохозяйственным нормативам. Во-вторых, большинство производственных циклов предъявляет собственные требования к качеству технической воды, используемой в технологических процессах, что обуславливает необходимость очистки воды, поступающей из источников водоснабжения, до заданных параметров. Таким образом, экологическое и технологическое обеспечение деятельности предприятия сводится к комплексной задаче подбора оптимальных систем водоочистки как на входе (водоподготовка), так и на выходе (очистка сточных вод). Многообразие отраслевой специфики, масштабов производства, локации, исходного качества воды и нормативных требований превращает данную задачу в сложную многокритериальную проблему оптимизации. Целью настоящего исследования является проведение сравнительного анализа существующих

методологических подходов к выбору систем водоочистки.

#### Аналитическая часть

В научной литературе представлен ряд подходов к моделированию выбора систем водоочистки. Значительная часть исследований сфокусирована на сфере хозяйственно-питьевого водоснабжения. Так, в работах [1, 2] разрабатываются формально-логические и математические модели, а также на их основе создаются экспертные системы (например, SupWater [2]) для автоматизированного выбора технологических схем и реагентных режимов очистки питьевой воды. Преимуществом подобных комплексов является автоматизация процесса, однако их применимость ограничена задачами водоподготовки для коммунальных нужд.

Вопросы очистки промышленных сточных вод чаще рассматриваются как частные случаи для конкретных отраслей, таких как гальваническое производство [5, 20] или химическая технология [6]. В зарубежных исследованиях также преобладает отраслевая или технологическая детализация. Применяются методы многокритериального принятия решений (MCDM, MADM) для выбора технологий очистки [7, 8], подход «выбора по преимуществам» [9], а также методы искусственного интеллекта, например, нейронные сети для моделирования мембранных процессов [10]. Эти работы предлагают развитый математический аппарат, однако, как правило, не ставят целью создание обобщенной модели, адаптируемой к произвольному типу предприятия с учетом необходимости очистки как входящего, так и исходящего потоков воды.

Проведенный анализ позволяет констатировать, что, несмотря на обширный массив публикаций, концептуальная задача общей постановки проблемы оптимального выбора системы водоочистки для промышленного предприятия в отечественной литературе часто рассматривается формально, а в зарубежной — сводится к решению частных, отраслевых задач. В связи с этим сохраняется актуальность разработки обобщенной многокритериальной модели, способной интегрировать требования к водоподготовке и очистке стоков для предприятий различных отраслей.

**Факторы, определяющие выбор системы водоочистки.** Формирование оптимальной системы водоподготовки и очистки сточных вод является многокритериальной задачей, решение которой требует системного учета широкого спектра взаимосвязанных факторов. Основой для их идентификации служит действующее законодательство в сфере водопользования [11], а также общепринятые методические рекомендации по проектированию соответствующих сооружений [12]. Все факторы могут быть структурированы в несколько ключевых групп.

1. Производственно-технологические характеристики предприятия. Данная группа является определяющей и включает:

- Отраслевую принадлежность и специфику технологических процессов. Именно они формируют ключевые требования к качеству технической воды на входе (например, к содержанию ионов, удельному сопротивлению, содержанию взвешенных веществ) и составу образующихся сточных вод (наличие тяжелых металлов, органических растворителей, специфических примесей).
- Масштаб производства, определяющий объемы водопотребления и водоотведения, что напрямую влияет на производительность и, следовательно, на капитальные затраты на очистные сооружения.
- Тип системы водопользования, который может быть прямоточным, последовательным, оборотным или комбинированным. Выбор схемы диктуется как технологической необходимостью, так и экономической целесообразностью и экологическими ограничениями.

Следует отметить, что в данной работе фокус внимания смещен на очистку технической воды, используемой непосредственно в производственных циклах. Вопросы водоподготовки для хозяйственно-бытовых нужд, регламентируемые СанПиН и достаточно детально освещенные в литературе [1-4,], в рамках данного исследования не рассматриваются, чтобы не усложнять модель.

2. Природно-климатические и гидрогеологические условия локации. Местоположение предприятия задает исходные параметры водных ресурсов и условия сброса:

- Характеристики источника водоснабжения (поверхностный/подземный водоток, его гидрохимический фон, сезонная изменчивость).
- Данные о грунтах и уровне грунтовых вод, необходимые для проектирования инженерных сооружений и оценки рисков фильтрации [12].
- Климатические условия, влияющие на температурный режим работы очистных систем и процессы биологической очистки.

Наличие развивающихся баз данных по гидрохимии водных объектов, например, для сибирских регионов [13-15], позволяет формализовать этот фактор и использовать региональные данные для параметризации моделей выбора.

3. Качественные показатели водных потоков. Ключевым этапом является детальная характеристика состава как исходной воды, так и сточных вод по широкому спектру показателей:

- Физические показатели: температура, мутность, цветность, запах, электропроводность.
- Химические показатели: pH, окисляемость (перманганатная, бихроматная), общее соледержание, щелочность, концентрации основных ионов ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Feобщ,

Mn), а также специфических загрязнителей (тяжелые металлы, нитраты/нитриты, органические соединения).

- Бактериологические и биологические показатели (общее микробное число, коли-индекс, наличие водорослей), критически важные для систем оборотного водоснабжения и биологических методов очистки.

Особое внимание необходимо уделить фактору сезонной динамики. Исследования показывают, что состав природных и, как следствие, сточных вод подвержен значительным внутригодовым колебаниям. Например, максимум рН наблюдается в летне-осенний период, а пик цветности — в летний [16, 17]. Концентрации легкорастворимых солей, таких как хлориды, часто возрастают зимой из-за использования противогололедных реагентов, тогда как содержание нитратов и сульфатов может резко увеличиваться весной в период снеготаяния и поступления ливневых стоков с урбанизированных территорий [16-18]. Для таежных регионов также описаны специфические сезонные закономерности в выносе химических элементов [22]. Игнорирование этой динамики может привести к неэффективной работе статически настроенной системы очистки.

### Заключение

Проведенный анализ демонстрирует, что задача выбора системы водоочистки для промышленного предприятия представляет собой многогранную проблему, выходящую за рамки простого подбора технологического оборудования. Установлено, что существующие методологические подходы часто фрагментарны: они сосредоточены либо на водоподготовке питьевой воды, либо на узкоспециализированных решениях для очистки сточных вод конкретных производств. Для создания эффективной и экономически обоснованной системы необходим комплексный учет трех взаимосвязанных групп факторов: производственно-технологических параметров предприятия, определяющих требования к воде и состав стоков; природно-климатических условий, влияющих на исходные ресурсы и работу сооружений; и детальных качественных показателей водных потоков, включая их значительную сезонную изменчивость. Игнорирование последнего аспекта, в частности, может нивелировать эффективность статически спроектированной очистной установки.

Таким образом, для преодоления выявленного методологического разрыва актуальна разработка обобщенной многокритериальной модели. Такая модель должна обеспечивать интегрированный подход к проектированию систем водоочистки, одновременно удовлетворяющих технологическим потребностям производства в качественной технической воде и строгим экологическим нормативам по сбросу сточных вод. Дальнейшие исследования целесообразно направить на формализацию выявленных факторов, разработку алгоритма их взвешивания и создание адаптируемого

инструмента поддержки принятия решений, что будет способствовать как экологической безопасности, так и технологической эффективности промышленных предприятий.

### Список литературы

1. Орлов С. П., Чуваков А. В., Нечаев Д. А. Разработка экспертной системы в составе интеллектуальной системы поддержки принятия решений в области водоподготовки и водоочистки природных вод // Современные наукоёмкие технологии. 2010. № 5. С. 44–51.
2. Боронина Л. В., Садчиков П. Н. Выбор оптимальных технологических схем очистки воды на основе программного комплекса «SupWater» // Вестник Самарского государственного архитектурно-строительного университета. 2013. № S4 (13). С. 15–18. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.S4.4.
3. Абуова Г. Б., Шиккульский М. И., Шиккульская О. М. Разработка системы поддержки принятия решений по выбору технологий очистки поверхностных природных вод // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 4 (46). С. 115–121. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-46-4-115-121.
4. Стукалин А. В., Шиккульская О. М., Сокольский А. Ф. Системный анализ двухступенчатой технологической схемы очистки воды // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2023. № 3 (45). С. 109–114. DOI: 10.52684/2312-3702-2023-45-3-109-114.
5. Ермоленко Б. В., Кузин Е. Н. Оптимизация процесса выбора технологий и оборудования для очистки сточных вод гальванического производства // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. 2024. Т. 67. № 2. С. 111–118. DOI: 10.6060/ivkkt.20246702.6913.
6. Советин Ф. С., Иванов А. А., Петров С. К., Семенова Д. В. Разработка компьютерной модели технологической схемы водоподготовки и водоочистки при получении метанола из природного газа // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37. № 11 (273). С. 41–43.
7. Ali Y., Pervez H., Khan J. Selection of the Most Feasible Wastewater Treatment Technology in Pakistan Using Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) // Water Conservation Science and Engineering. 2020. Vol. 5. P. 199–213. DOI: 10.1007/s41101-020-00094-6.
8. Gao G.-X., Liu Y.-J., Qiao J.-F., et al. MADM method considering attribute aspirations with an application to selection of wastewater treatment technologies // Kybernetes. 2015. Vol. 44. No. 5. P. 739–756. DOI: 10.1108/K-07-2014-0161.
9. Arroyo P., Molinos-Senante M. Selecting appropriate wastewater treatment technologies using a choosing-by-advantages approach // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 625. P. 819–827. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.12.331.
10. Jawad J., Hawari A. H., Zaidi S. J. Artificial neural network modeling of wastewater treatment and desalination using membrane processes: A review //

Chemical Engineering Journal. 2021. Vol. 419. P. 1–21. DOI: 10.1016/j.cej.2021.129540.

11. Федеральный закон от 07.12.2011 № 416-ФЗ (ред. от 24.04.2024) «О водоснабжении и водоотведении».

12. Комарова Л. Ф., Сомин В. А. Комплексное использование водных ресурсов: учебник. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2024. 119 с.

13. Shiqi L., Shevchenko V., Chubarenko B., et al. A database of water chemistry in eastern Siberian rivers // Scientific Data. 2022. Vol. 9. Article 737. DOI: 10.1038/s41597-022-01844-y.

14. Марков М. Л., Потапова Г. М., Задонская О. В. Региональные особенности эколого-геохимического состояния поверхностных водных объектов в таёжной зоне Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 7–15. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2589.

15. Савичев О. Г. Фоновые концентрации веществ в речных водах таёжной зоны Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 334. С. 169–175.

16. Гагарина О. В., Прокашев М. М., Плеханова В. В. О сезонных изменениях качества вод Ижевского пруда // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Наука о Земле. 2018. Т. 28. № 2. С. 147–155.

17. Гаранцева К. Р., Егорова Е. В., Лебедев А. Т. Моделирование состава сточных вод, поступающих на очистные сооружения // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. 2011. № 26. С. 677–681.

18. Янин Е. П. Влияние весеннего половодья на техногенную поставку и распределение химических элементов в речных водах // Экологическая экспертиза. 2020. № 5. С. 2–11. DOI: 10.36535/0869-1010-2020-05-1.

19. Наиболее успешные коммерциализированные технологии в области очистки воды / Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, С. А. Рублева [и др.] // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны» – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2024. – С. 84-87.

20. Экономический расчет реагентного метода очистки сточных вод гальванических производств / Ю. И. Капустин, Г. Е. Калякина, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 8(204). – С. 63-64.

21. Применение CALS-технологий при организации водного хозяйства промышленного предприятия / Н. В. Гусева, Ю. М. Аверина, А. М. Бессарабов, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 1(280). – С. 73-75.

22. Кожевникова Н. К., Болдескул А. Г., Луценко Т. Н. Состав почвенных вод горно-лесных ландшафтов Верхней Уссури и оценка выноса химических элементов // Биота и среда природных территорий. 2023. Т. 11. № 2. С. 62–74. DOI: 10.25221/2782-1978\_2023\_2\_4.

УДК 544.723.212

Немеренко О.В., Смирнова С.С., Маркова Е.Б.

### **Влияние природы редкоземельных элементов на активность и селективность ванадитовых катализаторов крекинга пропана**

Немеренко О.В. – студентка бакалавриата кафедры Физической и коллоидной химии РУДН

Смирнова С.С. - аспирант кафедры Физической и коллоидной химии РУДН

Маркова Е.Б. – к.х.н., доцент кафедры Физической и коллоидной химии РУДН

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В данном исследовании изучалась каталитическая активность ванадитов редкоземельных элементов (Nd, Eu, Ho) в процессе крекинга пропана. Катализаторы были синтезированы методом твердофазного синтеза. Процесс каталитического крекинга пропана исследовали в диапазоне температур 100–900 °С в проточном реакторе, анализируя состав продуктов методом газовой хроматографии. Кислотно-основные свойства поверхности катализаторов определяли индикаторным методом Гаммета–Танабе. Результаты показали влияние природы редкоземельного элемента в составе ванадита на текстуру поверхности, кислотность и, как следствие, на активность и селективность в реакции крекинга. Полученные данные подтверждают перспективность использования ванадитов редкоземельных элементов, в том числе синтезированных из техногенного сырья, в качестве катализаторов для нефтехимических процессов.*

*Ключевые слова:* каталитический крекинг пропана, ванадиты редкоземельных элементов, твердофазный синтез

### **THE EFFECT OF RARE-EARTH ELEMENT NATURE ON THE ACTIVITY AND SELECTIVITY OF VANADITE CATALYSTS IN PROPANE CRACKING**

Nemerenco O.V., Smirnova S.S., Markova E.B.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*In this study, the catalytic activity of vanadites of rare earth elements (Nd, Eu, Ho) in the process of propane cracking was studied. The catalysts were synthesized by solid-phase synthesis. The process of catalytic cracking of propane was studied in the temperature range of 100-900 °C in a flow reactor, analyzing the composition of the products by gas chromatography. The acid-base properties of the catalyst surface were determined by the Gammet–Tanabe indicator method. The results showed the influence of the nature of the rare earth element in vanadite on the surface texture, acidity and, as a result, on the activity and selectivity in the cracking reaction. The data obtained confirm the prospects of using vanadites of rare earth elements, including those synthesized from man-made raw materials, as catalysts for petrochemical processes.*

*Keywords:* catalytic cracking of propane, vanadites of rare earth elements, solid-phase synthesis

#### **Введение**

В настоящее время проблема поиска и разработки высокоэффективных и экономически целесообразных катализаторов для процессов глубокой переработки углеводородного сырья остается одной из наиболее значимых в нефтехимической промышленности. Особый интерес представляют процессы каталитического крекинга, позволяющие получать ценные продукты, такие как низшие олефины, которые являются ключевым сырьем для производства полимеров и широкого спектра органических соединений. Крекинг пропана, являющегося доступным побочным продуктом нефтепереработки и газодобычи, представляет собой перспективный путь получения пропилена, спрос на который стабильно растет на мировом рынке [1].

Эффективность процесса крекинга пропана в решающей степени определяется свойствами применяемого катализатора, который должен сочетать

высокую активность, селективность и стабильность. В современных промышленных процессах нашли применение различные типы катализаторов крекинга.

Основные катализаторы, используемые в процессе крекинга:

- Цеолиты (например, типа Y и ZSM-5): благодаря своей кислотной природе и строго регулируемой пористой структуре, они являются наиболее распространенными катализаторами в установках каталитического крекинга нефтяных фракций. Их основной недостаток – быстрая дезактивация из-за коксообразования [2].

- Оксидные системы (на основе Cr, Mo, V и др.): Эти катализаторы часто демонстрируют высокую селективность в реакциях дегидрирования. В последние годы возрастающее внимание уделяется катализаторам на основе ванадитов редкоземельных элементов (РЗЭ), которые проявляют уникальные структурные и окислительно-восстановительные свойства, делая их

перспективными для реакций крекинга и дегидрирования [3].

Одним из критических факторов, определяющих каталитическую активность, является текстура поверхности катализатора. Параметры текстуры, такие как удельная поверхность, пористость, объем и распределение пор по размерам, напрямую влияют на доступность активных центров для молекул реагентов, диффузию продуктов реакции и, как следствие, на общую эффективность и селективность каталитического процесса [4].

Исследование и разработка новых катализаторов актуальны не только с фундаментальной, но и с прикладной точки зрения, в контексте решения экологических проблем и повышения эффективности использования ресурсов. Ярким примером такой проблемы является накопление и утилизация «хвостов» (отходов обогащения) на Стойленском горно-обогатительном комбинате (ГОК). Эти хвосты, представляющие собой мелкодисперсный материал, содержат значительные концентрации редкоземельных и других ценных элементов. Накопление огромных объемов таких отходов приводит к отчуждению земель, пылевому загрязнению атмосферы и риску загрязнения водоемов. Таким образом, разработка технологий извлечения РЗЭ из техногенных месторождений, каковыми являются хвосты обогащения, является острой необходимостью. В данном контексте использование редкоземельных элементов, в том числе для синтеза катализаторов (таких как ванадаты РЗЭ), позволяет не только решить фундаментальную научную задачу, но и рассмотреть возможность создания добавленной стоимости на основе переработки промышленных отходов [5].

Таким образом, данное исследование направлено на углубление понимания механизмов взаимодействия текстуры поверхности катализаторов с их активностью, что может способствовать разработке более эффективных катализаторов для процессов крекинга и других нефтехимических реакций.

### Экспериментальная часть

Для исследования каталитической активности ванадитов лантаноидов образцы были получены методом твердофазного синтеза по схеме, представленной ниже (рис. 1).

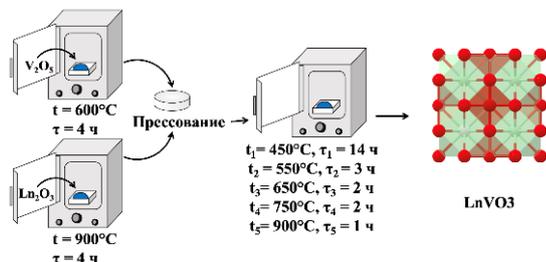


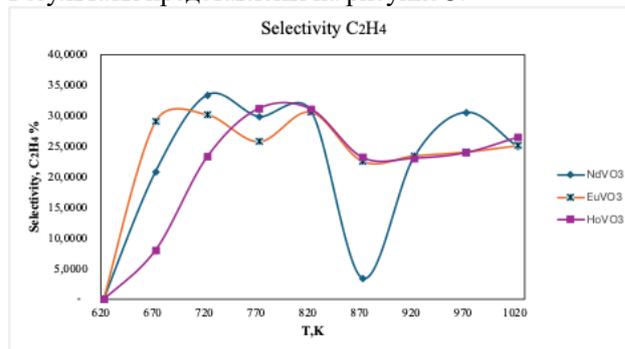
Рис. 1. Схема получения ванадитов РЗМ ( $LnVO_3$  ( $Ln = Nd, Eu, Ho$ ))

Каталитический крекинг пропана проводился в диапазоне температур 100-900 °C с шагом 50 °C на стендовой установке с проточным реактором. Реакцию в каждой из температур отслеживали с помощью хроматографа "Кристалл 5000М" (Йошкар-Ола, Россия), оснащенного пламенно-ионизационным

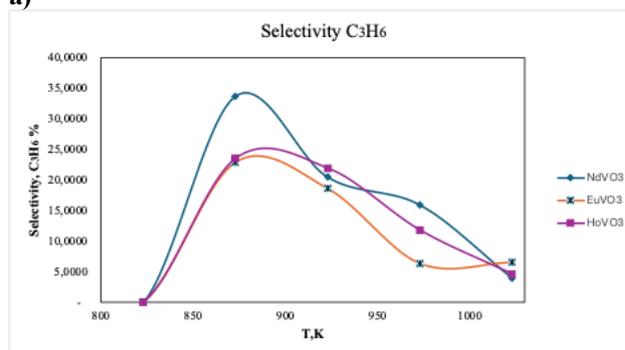
детектором и детектором по теплопроводности. В качестве инертного газа-носителя использовался аргон. Карбеновая селективность была вычислена по формуле:

$$S_{carbon}(x) = \frac{a_i}{3} \times \frac{n_{i\text{ВЫХ}}}{n_{C_3H_8\text{ВХОД}} - n_{C_3H_8\text{ВВЫХ}}} \times 100\%$$

где  $a_i$ , - число атомов углерода в продукте (i),  $n_{i\text{ВЫХ}}$  - молярный поток продукта (i) на выходе из реактора,  $n_{C_3H_8\text{ВХОД}}$  и  $n_{C_3H_8\text{ВВЫХ}}$  - молярный поток  $C_3H_8$  на входе в реактор и молярный поток  $C_3H_8$  на выходе из реактора. Распределение центров поверхности по кислотно-основным свойствам определяли индикаторным методом Гаммета и Танабе с использованием 6 индикаторов со значениями рКа в интервале от 3,56 до 14,1. На основании полученных данных была построена диаграмма сравнения зависимости показателей кислотности для образцов с разными красителями. Результаты представлены на рисунке 3.



а)



б)

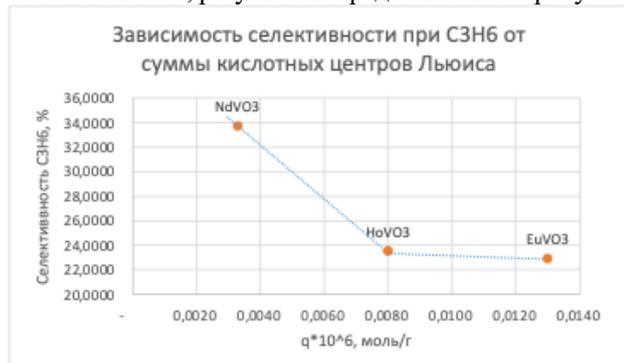
Рис. 2. Температурные зависимости селективности: (а) - по этилену, (б) - по пропилену в присутствии разных ванадитных катализаторов



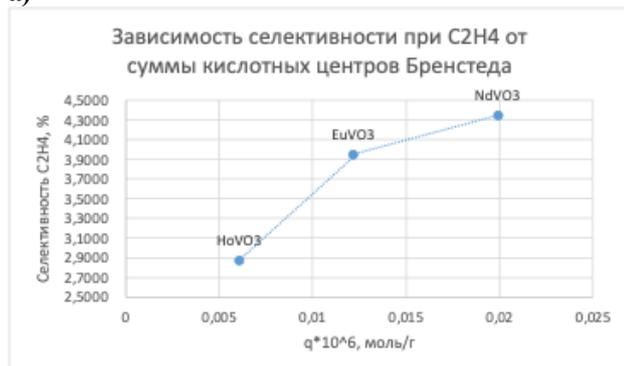
Рис. 3. Зависимость показателей кислотности ванадитных катализаторов для красителей

Была найдена зависимость селективности ванадатов по целевым продуктам – пропилену и этилену от

количества кислотных центров Льюиса и Бренстеда соответственно, результаты представлены на рисунке 4.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость селективности ванадитных катализаторов при (а) C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> от суммы кислотных центров Льюиса, (б) C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> от суммы кислотных центров Бренстеда

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования каталитического крекинга пропана на синтезированных ванадатах редкоземельных элементов (Nd, Eu, Ho) позволили установить четкую зависимость каталитического поведения от природы редкоземельного катиона. Данные, представленные на Рисунке 2, демонстрируют, что все изученные катализаторы активны в исследуемой реакции, однако температурные профили селективности по этилену (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) и пропилену (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) для них существенно различаются. Это указывает на то, что энергетика элементарных стадий процесса (адсорбция, активация, десорбция) чувствительна к изменению состава катализатора.

Ключевым фактором, определяющим эти различия, являются кислотно-основные свойства поверхности, которые, как показано на Рисунке 3, варьируются в ряду Nd-Eu-Ho. Катализатор с наиболее развитой кислотностью (наибольшая концентрация центров средней силы) проявил и наивысшую активность, что подтверждает кислотный характер активных центров, ответственных за крекинг пропана.

Наиболее значимым результатом является установление прямых корреляционных зависимостей между селективностью и типом кислотных центров (Рисунок 4). Обнаружено, что селективность образования пропилена линейно зависит от суммы кислотных центров Льюиса, тогда как селективность по этилену определяется концентрацией центров

Бренстеда. Это прямое экспериментальное доказательство позволяет предположить различный механизм формирования C<sub>2</sub> и C<sub>3</sub> олефинов: пропилен преимущественно образуется на центрах Льюиса, вероятно, через реакции моно- или бимолекулярного крекинга, в то время как этилен – на центрах Бренстеда, возможно, через механизмы, включающие стадию дегидрирования. Таким образом, природа редкоземельного элемента, влияя на соотношение и силу центров Льюиса и Бренстеда на поверхности ванадата, выступает ключевым параметром для управления селективностью всего процесса.

### Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что синтезированные методом твердофазного синтеза ванадиты редкоземельных элементов (Nd, Eu, Ho) являются активными катализаторами в реакции крекинга пропана. Установлено, что природа редкоземельного элемента оказывает определяющее влияние на каталитические свойства через формирование специфических кислотно-основных характеристик поверхности. Наиболее значимым результатом является выявление четкой корреляции между типом кислотных центров и селективностью процесса: образование пропилена преимущественно связано с центрами Льюиса, а этилена – с центрами Бренстеда. Эти данные не только углубляют понимание механизма реакции, но и создают основу для целенаправленного дизайна катализаторов с заданной селективностью путем выбора соответствующего редкоземельного элемента. Полученные результаты подтверждают перспективность использования ванадитов РЗЭ, в том числе синтезированных из техногенного сырья, для разработки эффективных катализаторов глубокой переработки легких углеводородов. Для дальнейшего развития данного направления необходимы исследования, направленные на оценку долговременной стабильности и оптимизацию текстурных свойств таких катализаторов.

### Список литературы

1. Ren T., Patel M., Blok K. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes //Energy. – 2006. – Т. 31. – №. 4. – С. 425-451.
2. Wachs I. E. Catalysis science of supported vanadium oxide catalysts //Dalton Transactions. – 2013. – Т. 42. – №. 33. – С. 11762-11769.
3. Sing K. S. W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) //Pure and applied chemistry. – 1985. – Т. 57. – №. 4. – С. 603-619.
4. Азингер Ф. Введение в нефтехимию. -М.: изд-во ГОСТОГИТЕХ-ИЗДАТ, 1961. 46 с
5. Froment G. F. Kinetics and reactor design in the thermal cracking for olefins production //Chemical engineering science. – 1992. – Т. 47. – №. 9-11. – С. 2163-2177.

УДК 544.473

Каштанова Н.А., Зенкова А.А., Полтавская С.А., Сыхраннова М.В., Сорокина А.Д.

**Получение водорода в реакции парового риформинга этанола на никелевых катализаторах: влияние состава алюмо-цериевого носителя**

Каштанова Ника Александровна, магистр 1-го года обучения Института фармации и биотехнологий, РУДН, Россия, Москва;

Зенкова Анастасия Александровна, магистр 1-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Полтавская Софья Александровна, магистр 1-го года обучения Института фармации и биотехнологий, РУДН, Россия, Москва;

Сыхраннова Мария Васильевна, магистр 1-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Сорокина Анна Дмитриевна, бакалавр 4-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В данном исследовании изучалось влияние состава алюмо-цериевого носителя на физико-химические и каталитические свойства никелевых катализаторов в процессе паровой конверсии этанола (ПКЭ). Были синтезированы никелевые катализаторы  $Ni/xAl_2O_3-(100-x)CeO_2$  ( $x=10, 50, 90$  мол.%) методом механохимического синтеза носителя с последующей пропиткой нитратом никеля и термообработками. Методами РФА и  $H_2$ -ТПВ установлено, что состав носителя оказывает значительное влияние на физико-химические свойства полученных систем: с увеличением содержания оксида алюминия происходит увеличение силы взаимодействия металла с носителем (данные  $H_2$ -ТПВ), а также уменьшение размеров частиц активного металла (данные РФА). Катализаторы были исследованы в процессе ПКЭ и выявлена возможность регулирования свойств катализаторов за счет оптимизации состава алюмо-цериевого носителя. Максимальный выход  $H_2$  (61%) достигнут для 10Ni/90AC при 600 °C в течение 7 часов. Стабильность образца 10Ni/90AC обусловлена наименьшим размером частиц активной фазы ( $\approx 10-11$  нм) с высоким взаимодействием «металл-носитель».*

*Ключевые слова: паровой риформинг этанола (ПКЭ), алюмо-цериевый носитель, никелевые катализаторы, механохимический синтез с пропиткой*

**PRODUCTION OF HYDROGEN VIA ETHANOL STEAM REFORMING ON NICKEL CATALYSTS: INFLUENCE OF THE ALUMINUM-CERIUM SUPPORT COMPOSITION**

Kashtanova N.A., Zenkova N.A., Poltavskaya S.A., Sykhrannova M.V., Sorokina A.D.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*This study investigated the influence of the aluminum-cerium support composition on the physicochemical and catalytic properties of nickel catalysts in the ethanol steam reforming process. Nickel catalysts  $Ni/xAl_2O_3-(100-x)CeO_2$  ( $x=10, 50, 90$ ) were synthesized using mechanochemical synthesis followed by impregnation. X-ray diffraction (XRD) and  $H_2$  temperature-programmed reduction ( $H_2$ -TPR) methods established that the support composition significantly affects the physicochemical properties of the obtained systems: an increase in the aluminum oxide content leads to an increase in the strength of metal-support interaction ( $H_2$ -TPR) and a decrease in the particle size of the active metal (XRD). The catalysts were tested in the ethanol steam reforming (ESR) process, revealing the possibility of regulating catalyst properties by optimizing the aluminum-cerium support composition. The maximum  $H_2$  yield (61%) was achieved for the 10Ni/90AC catalyst at 600 °C, this catalyst is stable for 425 minutes. This is attributed to the smallest particle size of the active phase ( $\approx 10-11$  nm) and strong metal-support interaction (XRD,  $H_2$ -TPR).*

*Keywords: Ethanol Steam Reforming (ESR), Nickel catalysts, Mechanochemical synthesis with impregnation*

**Введение**

Сокращение запасов ископаемых топливных ресурсов, постоянный рост их стоимости, а также загрязнение окружающей среды заставляет мировое сообщество искать решение проблемы обеспечения человечества энергией и источниками химического сырья.

Оптимальным решением данной проблемы является переход с углеводородного сырья - нефти и газа - на возобновляемые источники энергии,

получаемые из биомассы, растительных масел и т. д. [1].

Водород рассматривается как альтернативное чистое топливо для будущего. Паровой риформинг этанола (ПКЭ) является углеродно-нейтральным и устойчивым зеленым методом производства водорода [2].

Ключевым фактором для достижения максимальной эффективности процесса является выбор катализатора. Никельсодержащие катализаторы широко используются, благодаря их

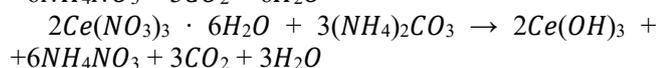
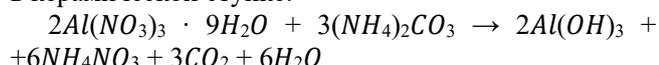
высокой активности и относительно низкой стоимости, однако они подвержены дезактивации из-за коксования и спекания активных частиц. Для повышения стабильности и активности никелевых катализаторов критически важным является выбор носителя, который обеспечивает дисперсию активного металла, влияет на кислотно-основные свойства и текстуру. В последние годы особое внимание уделяется алюмо-цериевым носителям, которые сочетают в себе преимущества оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) — высокую удельную поверхность, и оксида церия ( $\text{CeO}_2$ ) — кислородную подвижность и устойчивость к коксованию.

Однако, в литературе встречается мало информации о влиянии состава алюмо-цериевого носителя (соотношение Al/Ce) на физико-химические и каталитические свойства катализаторов. Это обуславливает актуальность и практическую значимость данной работы, в которой изучается влияние состава алюмо-цериевого носителя на свойства никелевых катализаторов в процессе парового риформинга этанола.

#### Экспериментальная часть

Носители с различным соотношением Al/Ce исходя из теоретически заданных соотношений были обозначены как  $10\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}90\text{CeO}_2$ ,  $50\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}50\text{CeO}_2$ ,  $90\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}10\text{CeO}_2$  с разными мольными соотношениями оксидов были приготовлены механохимическим методом. За основу методики синтеза была взята методика Хамидреза и др. [3].

На аналитических весах были взяты рассчитанные навески солей  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (квалификация ХЧ, производитель «Химмед», Россия),  $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (квалификация ХЧ, производитель «ALDOSА», Россия) и  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  (квалификация ХЧ, производитель «ALDOSА», Россия). Навеска  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  была взята с 20%-ным избытком. Предварительно измельчив карбонат аммония, проводили твердофазный синтез в керамической ступке, в которую были помещены соли алюминия и церия и аммония. При механическом перемешивании наблюдали выделение кристаллизационной воды. Далее было добавлено минимальное количество ацетона для гомогенизации смеси. Смесь перетиралась в течение 15 минут. Полученную суспензию оставили сушиться на воздухе сутки. Затем содержимое ступки перенесли в тигель и просушили в муфельной печи при  $180^\circ\text{C}$  в течение 3 часов (скорость нагрева —  $2^\circ\text{C}/\text{мин}$ ). Полученный носитель представлял собой бледно-желтый неоднородный порошок с частицами разного размера. Для достижения однородности порошок был перетёрт в керамической ступке.



Введение активной фазы никеля производили методом влажной пропитки носителей разных составов раствором нитрата никеля. В обоих образцах

расчетная доля никеля на массу оксидов составляла 10 мас.%. Образцы сушили на воздухе при комнатной температуре в течение 3 дней, а затем прокаливали при  $600^\circ\text{C}$  в течение 3 ч (скорость нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ ).

Прокаленные образцы восстанавливали в токе  $\text{H}_2/\text{Ar}$  под контролем  $\text{H}_2$ -ТПВ (нагрев до  $900^\circ\text{C}$ , скорость нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ ).

Фазовый анализ образцов проводили с использованием рентгеновской порошковой дифракции на приборе PowDIX 600. Дифрактограммы были записаны в геометрии Брэгга-Брентано ( $\theta - \theta$  геометрия) с вертикальной плоскостью углемера. В качестве материала анода использовался Cu с Ni-фильтром толщиной 0,2 мм. Анодное напряжение и ток были установлены на 30 кВ и 10 мА соответственно. Регистрацию проводили с использованием излучения Cu ( $K\alpha + \beta$ ) ( $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ) с размером шага  $0,01^\circ$  и скоростью  $3,5^\circ/\text{мин}$ . Высота коллимирующей щели составляла 1 мм. Качественный фазовый анализ полученной дифрактограммы был проведен с использованием программного обеспечения Crystallographica Search-Match 3.0, которое включает базу данных ICDD Powder Diffraction File (PDF-2).

Размеры кристаллитов определяли с помощью уравнения Шеррера в программном обеспечении Origin.

Уравнение Шеррера [4]:

$$D = K \cdot \lambda / \beta \cdot \cos \theta$$

$D$  — размер частицы в направлении, перпендикулярном плоскости отражения,

$K$  — постоянная Шеррера,  $\lambda$  — длина волны рентгеновского излучения,  $\beta$  — ширина пика на полувысоте,  $\theta$  — угол дифракции.

Эксперименты по температурно-программируемому восстановлению проводились перед каталитическими экспериментами, для исследования эффективности восстановления металлов *in situ* в зависимости от состава образца. В каждом испытании  $\text{H}_2$ -ТПВ использовалось 75 мг катализатора. Образцы загружали в U-образный кварцевый реактор непрерывного действия и нагревали до  $900^\circ\text{C}$  со скоростью  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$  в 5 об.% газовой смеси  $\text{H}_2/\text{Ar}$ , пропускаемой со скоростью потока 50 мл/мин. Потребление водорода измерялось с помощью детектора по теплопроводности (ДТП). Обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Origin. Полученные пики поглощенного водорода были разложены по функции Войта, далее была найдена площадь каждого пика для определения доли, приходящейся на этот пик.

Каталитическую реакцию проводили в линейном проточном кварцевом реакторе при атмосферном давлении при температуре  $600^\circ\text{C}$  в течение 7 часов. Катализаторы весом 30 мг предварительно восстанавливали в токе 5 об.%  $\text{H}_2/\text{Ar}$  (50 мл/мин) при температуре от 25 до  $800^\circ\text{C}$  (скорость нагрева  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ ). Смесь этанола и воды подавали с помощью

шприцевого насоса и смешивали с потоком подаваемого газа Ar в мольном соотношении EtOH:H<sub>2</sub>O:Ar = 1:4:18. Использовались газы высокой чистоты (99,999%), расход которых контролировался регуляторами массового расхода. Продукты анализировались с помощью газового хроматографа «Хроматэк-Кристалл 5000» (Россия), оснащенного детектором по теплопроводности (ДТП) и пламенно-ионизационным детектором. В программном обеспечении «Хроматэк Аналитик 2.6» осуществлялось управление работой хроматографа.

Для определения коэффициентов пересчета по хроматограмме были определены площади пиков, по которым рассчитывались молярные скорости потока с использованием внешних стандартов соответствующих веществ.

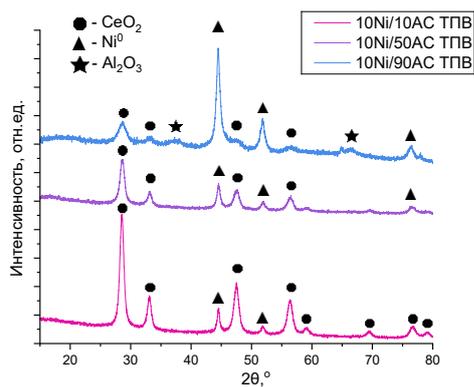
Для реакции парового риформинга этанола выход H<sub>2</sub> (%) и селективности продуктов (%) были рассчитаны в соответствии с формулами, где n - молярные скорости потока каждого продукта на входе (in) и выходе (out) [5,6].

$$\text{Выход } H_2, \% = \frac{n_{H_2, \text{out}} \cdot 100\%}{6(n_{C_2H_5 \text{ OH}, \text{in}})}$$

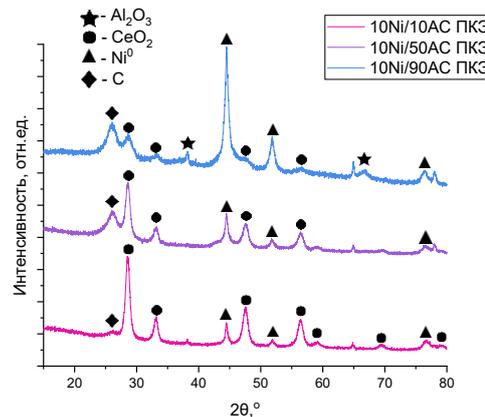
$$S_x, \% = \frac{n_{x, \text{out}} \cdot 100\%}{\sum n_{x, \text{out}}}$$

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования до катализа показали, что с ростом содержания оксида алюминия в образце, размер кристаллитов никеля и оксида церия уменьшается, что может быть связано с восстановлением частиц никеля из шпинельных форм, образующихся в алюминий обогатненных образцах (Рис 1а).



(a)



(б)

Рис. 1. Дифрактограммы образцов Ni/xAl до (а) и после (б) катализа

Фазовый состав образцов был также исследован методом РФА после каталитических испытаний. При сравнении дифрактограмм образцов до и после эксперимента было выяснено, что в ходе катализа состав не изменился. Однако, для всех катализаторов можем наблюдать уширенный пик примерно при  $2\theta = 26^\circ$ , соответствующий графитированному углероду (PDF-2 No000-01-0646 и PDF-2 No000-75-1621) [7] в дополнение к остальным фазам, наблюдаемым ранее. Интенсивность пиков углерода уменьшается с уменьшением содержания алюминия от образца 10Ni/90Al к 10Ni/10Al, что указывает на отсутствие графитированного углерода, который может быть обнаружен данным методом анализа. Смещения пиков фаз до и после катализа не наблюдалось. (Рис 1б).

С помощью метода температурно-программируемого восстановления была изучена восстановительная способность катализаторов и взаимодействие активной фазы металла с носителем. Профили H<sub>2</sub>-ТПВ для образцов Ni/100Al, Ni/90Al, Ni/50Al, Ni/10Al, Ni/0Al, представлены на рисунке 2. Видно, что с ростом содержания алюминия в образце количество и доля высокотемпературных пиков увеличивается, что связано с увеличением доли шпинельных форм никеля на поверхности, восстановление которых позволяет получить частицы никеля меньшего размера, что согласуется с данными РФА, и большим взаимодействием «металл-носитель». На образце Ni/10Al преимущественно восстанавливаются оксидные формы никеля.

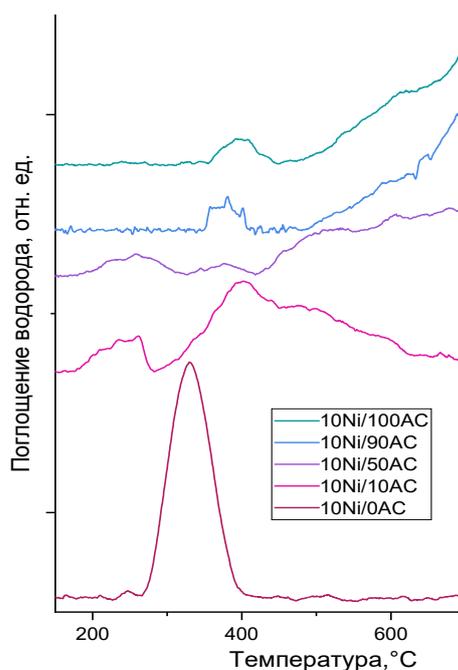


Рис. 2.  $H_2$ -ТПВ профили образцов Ni/100AC, Ni/90AC, Ni/50AC, 10AC, 0AC

Каталитическая активность никелевых образцов на сложнооксидных алюмо-цериевых носителях исследовалась в реакции паровой конверсии этанола в режиме нагрева при температуре 600 °C с соотношением  $H_2O:EtOH=4:1$ .

Соотношение Al:Ce в составе носителя существенно влияет на выходы продуктов (Табл.1). Наилучшие результаты показал образец 10Ni/90AC, для которого выход водорода составляет 61%. Более того, выход водорода продолжает расти в течение всего эксперимента, катализатор не дезактивируется на протяжении 425 минут. Образец 10Ni/100AC является достаточно стабильным, дезактивация практически не наблюдается, а выход водорода составляет 54%. Все остальные катализаторы дезактивируются спустя 250-350 минут.

Таблица 1. Выход водорода в реакции ПКЭ

Образец	Выход $H_2$ , %	
	исходная активность	через 7 часов катализа
Ni/100A	46	54
Ni/90AC	42	61
Ni/50AC	42	40
Ni/10AC	43	38

### Заключение

В данной работе никелевые катализаторы состава  $Ni/xAl_2O_3-(100-x)CeO_2$  с разным мольным соотношением оксидов в составе носителя ( $x = 10, 50, 90$ ) были синтезированы методом механохимического синтеза с дальнейшим нанесением активной фазы методом пропитки полученного ксерогеля и

последующими термообработками. В качестве образцов сравнения использовали никелевые образцы на монооксидных носителях  $Ni/Al_2O_3$  и  $Ni/CeO_2$ .

Методами РФА и  $H_2$ -ТПВ было установлено, что состав носителя оказывает значительное влияние на физико-химические свойства полученных систем: с увеличением содержания оксида алюминия в составе носителя происходит увеличение силы взаимодействия металла с носителем (данные  $H_2$ -ТПВ), и уменьшение размеров частиц активного металла (данные РФА).

Катализаторы Ni/AC продемонстрировали высокую активность в паровой конверсии этанола (соотношение вода:этанол = 4:1,  $T = 600$  °C) с целью получения водорода. Выходы водорода и побочных продуктов зависели от состава носителя. Лучшие результаты по активности и стабильности продемонстрировал образец Ni/90AC, выход  $H_2$  для через 7 часов испытаний составил 61%, что обусловлено наименьшим размером частиц активной фазы с высоким взаимодействием «металл-носитель».

На серии образцов  $Ni/xAl_2O_3-(100-x)CeO_2$  показана возможность направленного формирования и регулирования свойств активных центров реакции парового риформинга за счет варьирования размера наночастиц и силы их взаимодействия с носителем.

### Список литературы

1. Королёв Ю. А. Паровой риформинг и дегидроксилирование глицерина на гетерогенных катализаторах: дис. – Институт органической химии им. НД Зелинского Российской академии наук, 2010.
2. Anil S. et al. A review on ethanol steam reforming for hydrogen production over  $Ni/Al_2O_3$  and  $Ni/CeO_2$  based catalyst powders // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – V. 47. – № 13. – P. 8177–8213.
3. Hamidreza Alipour, Seyed Mehdi Alavi, Mehran Rezaei, Ehsan Akbari, Mohammad Varbar. The role of various preparation techniques and nickel loadings in ethanol steam reforming over mesoporous nanostructured  $Ni-Al_2O_3$  catalysts // Journal of the Energy Institute. – 2024. – Vol. 112.
4. Ramachandran V.S., Beaudoin James Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology, 2001.
5. Chen W. H. et al. Design of experiment for hydrogen production from ethanol reforming: A state-of-the-art review // Fuel. – 2023. – Vol. 342. – P. 127871.
6. Xiang D., Li P., Yuan X. Process modeling, optimization, and heat integration of ethanol reforming process for syngas production with high  $H_2/CO$  ratio // Processes. – 2019. – Vol. 7. – № 12. – P. 960.
7. Igor Luisetto, Simonetta Tuti, Chiara Battocchio, Sergio Lo Mastro, Armida Sodo.  $Ni/CeO_2-Al_2O_3$  catalysts for the dry reforming of methane: The effect of  $CeAlO_3$  content and nickel crystallite size on catalytic activity and coke resistance // Applied Catalysis A: General. 2015. -Vol. 500. - P. 12-22.

УДК 631.4

Холодова Е. А., Журавлева О. С.

## **Инновационные аспекты анализа плодородия почв для оценки ресурсоэффективного потенциала земельных ресурсов**

Холодова Елена Александровна – студентка группы МТ-19, кафедры логистики и экономической информатики; lena.kholodova17@mail.ru

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; zhuravleva.o.s@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

*В статье рассмотрена проблема устойчивого повышения плодородия почв как ключевого фактора, определяющего производственный потенциал агроландшафтов и экологическую устойчивость землепользования. Проведен комплексный анализ современных методов оценки плодородия почв, включая интеграцию физических, химических и биологических показателей. Рассмотрены инновационные цифровые подходы, такие как геоинформационные системы (ГИС), дистанционное зондирование, сенсорные сети, технологии Интернета вещей (IoT) и искусственный интеллект, для оценки ресурсоэффективного потенциала земель. Кроме того, представлены методические подходы к расчёту интегральных индексов ресурсоэффективности земель, объединяющих натуральные, экономические и качественные показатели.*

*Ключевые слова: плодородие почв, ресурсоэффективность, ГИС, дистанционное зондирование, точное земледелие, искусственный интеллект, земельные ресурсы.*

## **Innovative Approaches to Soil Fertility Analysis for Assessing the Resource-Efficiency Potential of Land Resources**

Kholodova E. A., Zhuravleva O. S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article addresses the issue of sustainable enhancement of soil fertility as a key factor determining the productive potential of agro-landscapes and the ecological stability of land use. A comprehensive analysis of modern methods for assessing soil fertility is conducted, including the integration of physical, chemical, and biological soil properties. Innovative digital approaches such as geographic information systems (GIS), remote sensing, sensor networks, Internet of Things (IoT) technologies, and artificial intelligence are examined for evaluating the resource-efficiency potential of land. In addition, methodological frameworks for calculating integrated indices of land resource efficiency, combining natural, economic, and qualitative indicators, are presented.*

*Key words: soil fertility, resource efficiency, GIS, remote sensing, precision agriculture, artificial intelligence, land resources.*

### **Введение**

Вопрос устойчивого повышения плодородия почв является одной из ключевых проблем современной аграрной науки, так как именно состояние почвенного покрова во многом определяет производственные возможности агроландшафтов и экологическую стабильность землепользования. Современные задачи агропромышленного комплекса усиливают актуальность рационального использования ограниченных земельных ресурсов. Согласно статистике, доля пашни в структуре земельного фонда страны составляет всего около 7,1%, а площадь всех сельскохозяйственных угодий не превышает 13%. В этой связи разработка методов точной оценки и прогнозирования динамики плодородия почв приобретает особое значение.

Уменьшение посевных площадей, вызванное урбанизацией, деградационными процессами, эрозией и засолением, усиливает необходимость внедрения инновационных методов анализа состояния почв и оценки ресурсоэффективности территории. Научно обоснованная оценка плодородия является базой для планирования севооборотов, оптимизации внесения удобрений и

формирования экологически безопасных агротехнологических решений.

Цель настоящего исследования заключается в разработке комплексного подхода к оценке плодородия почв с использованием современных методов анализа, позволяющего интегрировать физико-химические, биологические и агрофизические показатели. Ключевыми задачами являются обоснование наиболее значимых характеристик, влияющих на плодородие, таких как содержание органического вещества, кислотность, влажность, пористость, наличие микроорганизмов, а также подвижные формы азота, фосфора и калия, и создание модели, позволяющей оценивать ресурсоэффективный потенциал земель [1].

В современных условиях традиционные методы агрохимического анализа часто оказываются недостаточно масштабируемыми и затратными при мониторинге больших территорий. Недостаточное финансирование и ограниченные возможности комплексного обследования почв затрудняют научно обоснованное распределение посевных площадей, планирование севооборотов и оптимальное применение удобрений и других агротехнических

мероприятий [2]. В условиях интенсивного земледелия неправильный выбор агротехнологий и несвоевременное внесение удобрений нередко ведут к уменьшению фактической урожайности и ухудшению качественных характеристик продукции. Помимо прямых потерь, это отражается на рациональности использования земельного фонда хозяйств.

При анализе ресурсной эффективности особое значение приобретает комплексный подход к оценке плодородия. Он предполагает не только учёт агрохимических параметров, но и исследование биологических и физических свойств почвы. Важным является строение верхнего горизонта, особенности минералогического состава, запасы продуктивной влаги, а также параметры, определяющие водно-воздушный и тепловой режимы. Совместное рассмотрение этих характеристик позволяет получить более достоверное представление о фактическом состоянии почвы и её потенциальных возможностях.

Как показывают результаты исследований [3], интеграция данных разных групп показателей повышает точность оценки и делает возможным установление связи между состоянием почвенного профиля и уровнем урожайности. Поэтому регулярное наблюдение за динамикой характеристик плодородия рассматривается как обязательный элемент устойчивого земледелия. Системный мониторинг позволяет заблаговременно выявлять признаки деградации, корректировать технологические решения и снижать вероятность экологических рисков.

Современные подходы, включающие геоинформационные системы, дистанционное зондирование, сенсорные сети и методы искусственного интеллекта, открывают новые возможности для точной и оперативной оценки плодородия почв и ресурсоэффективного потенциала земельных угодий.

#### **Теоретические основы оценки плодородия почв**

Плодородие почвы определяется как способность почвы удовлетворять потребности растений в элементах питания, влаге и воздухе, а также обеспечивать оптимальные условия для их нормальной жизнедеятельности [4]. Это эмерджентное свойство, проявляющееся при взаимодействии физических, химических и биологических компонентов почвы. Следует отметить, что плодородие любой почвы может быть повышено при правильной организации агротехнических мероприятий и рациональном использовании земельных ресурсов. При этом две почвы с одинаковым химическим составом могут демонстрировать различный эффективный уровень плодородия на определённом отрезке времени, что связано с различиями в водно-физических свойствах, биологических особенностях и способах возделывания культур.

Физико-механические параметры почвы определяют условия для развития корневой системы

и регулируют водный, воздушный и тепловой режимы. К числу наиболее значимых характеристик относятся:

- гранулометрический состав;
- агрегатная структура;
- плотность сложения;
- влагоудерживающая способность;
- водопроницаемость.

Эти свойства во многом определяют динамику доступной влаги, а также степень аэрируемости почвенного слоя, что критически важно для биохимических процессов.

Химический блок плодородия включает кислотность, содержание органического вещества, концентрации доступных форм азота, фосфора, калия и микроэлементов. Кислотность определяет способность почвы удерживать и обменивать катионы, что отражается на усвоении питательных веществ растениями. Органическое вещество играет роль ключевого регулятора питания и структурообразования, влияя на буферность и агрофизические свойства почвы.

Жизнедеятельность почвенной биоты (бактерий, грибов, мезо- и макрофауны) обеспечивает разложение органических субстратов, минерализацию элементов питания и формирование стабильной структуры. Фитосанитарное состояние почвы также является индикатором её устойчивости к биотическим стрессам [4].

#### **Инновационные методы анализа плодородия**

В последние годы наблюдается переход от традиционных лабораторных методов к многоуровневым цифровым системам мониторинга, обеспечивающим высокую пространственную и временную детализацию данных.

##### Геоинформационные системы (ГИС)

ГИС-технологии позволяют интегрировать пространственные данные о почвах, растительности, рельефе и инфраструктуре и формировать цифровые карты агроландшафтов. Применение ГИС обеспечивает:

- визуализацию неоднородности почвенного покрова;
- оценку зон деградации;
- построение моделей распределения плодородия;
- поддержку принятия решений на основе пространственных индексов.

ГИС служат базой для интеграции данных дистанционного зондирования, сенсорных измерений и результатов математического моделирования [5].

##### Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

Современные спутниковые и авиационные системы обеспечивают съёмку в широком диапазоне длин волн, что делает возможной оценку таких показателей, как:

- влажность почвы;
- температурный режим;
- текстура поверхности;

- состояние растительного покрова.

Методы радиолокации позволяют получать данные независимо от времени суток и погодных условий. Спектральные сигнатуры почв и растений используются для построения карт состояния земельных ресурсов [6].

Современные сенсорные технологии играют ключевую роль в точном прогнозировании урожайности. Датчики позволяют собирать комплексные данные о состоянии почвы (влажность, температура, pH, содержание питательных веществ), растениях (биомасса, содержание хлорофилла, индекс вегетации NDVI, стрессовое состояние) и погоде (температура, осадки, солнечное излучение, скорость ветра). Мультиспектральные и тепловизионные камеры, установленные на беспилотных летательных аппаратах, формируют детализированные картограммы фитосанитарного состояния посевов, а датчики на уборочной технике с высокой пространственной точностью регистрируют урожайность. Совместный анализ этой информации посредством алгоритмов машинного обучения выявляет сложные корреляции между различными параметрами и позволяет строить высокоточные прогнозы урожайности [7].

Технология Интернета вещей (IoT) позволяет связывать различные удаленные датчики, включая датчики почвы, роботов и беспилотные летательные аппараты, обеспечивая автоматическое взаимодействие устройств через Интернет. В точном земледелии IoT используется для улучшения пространственного управления, что способствует увеличению урожайности и одновременно предотвращает чрезмерное или неправильное использование удобрений и пестицидов [8].

Одним из наиболее перспективных направлений применения искусственного интеллекта (ИИ) в сельском хозяйстве является мониторинг состояния растений и почвы. Здоровье культур напрямую зависит от содержания макро- и микроэлементов в почве, а также от внешних условий, таких как температура, влажность и освещенность. Традиционные методы оценки почвы и состояния растений, основанные на визуальном осмотре и лабораторных анализах, трудоёмки и имеют элемент субъективности.

Современные технологии позволяют заменить часть этих процессов автоматизированными системами. Специализированные дроны с мультиспектральными и тепловизионными камерами выполняют аэрофотосъёмку посевов и почвы, а ИИ анализирует полученные изображения, выявляя стрессовые состояния растений, недостаток питательных веществ или наличие заболеваний. Подобные системы позволяют создавать точные карты состояния полей и прогнозируемой урожайности, что помогает фермерам принимать обоснованные решения по внесению удобрений, поливу и защите культур [9].

**Методики оценки ресурсоэффективного потенциала земельных ресурсов**

Ресурсоэффективный потенциал земельных ресурсов определяется как способность земель обеспечивать устойчивое и экономически оправданное производство продукции при оптимальном использовании природных, трудовых и капитальных ресурсов. Для его оценки применяются комплексные методики, объединяющие натуральные, стоимостные и качественные показатели земли.

#### 1. Натуральные показатели

Натуральные показатели позволяют количественно оценивать продуктивность земли и включают:

- Урожайность сельскохозяйственных культур (ц/га);
- Запасы питательных элементов в почве (азот, фосфор, калий);
- Водоёмкость и запас влаги в почве;
- Площадь орошаемых земель;
- Соотношение пашни и других категорий земель.

Эти показатели дают базовое представление о биологическом потенциале земель и их способности поддерживать устойчивое производство сельскохозяйственной продукции.

#### 2. Экономические критерии

Оценка ресурсоэффективного потенциала земель с точки зрения экономики базируется на анализе следующих параметров:

- Выход продукции с единицы площади (руб./га);
- Коэффициент земельной рентабельности, рассчитываемый как отношение полученной прибыли к стоимости эксплуатируемого земельного участка;
- Показатели землеотдачи и землеёмкости, отражающие соотношения между объёмом произведённой продукции, площадью угодий и величиной вовлечённых ресурсов;
- Показатель удельной валовой добавленной стоимости, определяемый как соотношение стоимости, созданной в рамках различных видов экономической деятельности, к общей площади земельного фонда.

Данная система экономических индикаторов предоставляет возможность для выявления участков с низкой экономической отдачей и определения приоритетных направлений оптимизации эксплуатации земельных ресурсов.

#### 3. Качественные характеристики

Для всесторонней оценки потенциала угодий принимаются во внимание их качественные свойства:

- Агрономические свойства почвы: содержание гумуса, уровень кислотности (pH), агрегатный состав, интенсивность биологических процессов;
- Экологический статус: устойчивость к процессам эрозии, степень деградации,

характеристики водно-воздушного баланса;

- Технологическая пригодность: уровень доступности для средств механизации, потенциальная возможность внедрения методов точного земледелия.

Интеграция этих показателей позволяет создавать комплексные модели ресурсоэффективного потенциала, отражающие как биологическую продуктивность, так и экономическую отдачу земли.

#### 4. Методы расчёта

Современные методики включают как традиционные статистические подходы, так и цифровые технологии:

- Индексные методы — построение комплексных индексов потенциала на основе нормированных натуральных, стоимостных и качественных показателей;
- Картографические методы (ГИС) — визуализация и пространственный анализ эффективности использования земель на уровне участка, региона или хозяйства;
- Модели прогнозирования на основе ИИ и машинного обучения — выявление взаимосвязей между состоянием почвы, агротехническими мероприятиями и урожайностью, прогнозирование экономической отдачи [9].

Пример расчёта интегрального индекса ресурсоэффективного потенциала может быть представлен как взвешенная сумма нормированных показателей:

$$REP = \sum_{i=1}^n \omega_i \times P_i$$

Где:

- $REP$  — ресурсоэффективный потенциал;
- $P_i$  —  $i$ -й показатель (натуральный, стоимостной, качественный);
- $\omega_i$  — вес показателя, отражающий его значимость для общей оценки;
- $n$  — количество показателей.

Применение подобных комплексных методик позволяет не только оценить текущее состояние земель, но и разрабатывать рекомендации по оптимизации агротехнических мероприятий, повышению урожайности, снижению затрат и обеспечению устойчивого использования ресурсов.

Современные подходы к оценке ресурсоэффективного потенциала земель опираются на интеграцию различных цифровых технологий, обеспечивающую комплексное и точное представление о состоянии земельных ресурсов.

#### 1. Геоинформационные системы

Применение геоинформационных систем в агроэкологическом анализе позволяет не просто совмещать пространственные и описательные данные, но и выстраивать их в единую аналитическую модель территории. В ГИС-интерфейсе

объединяются сведения о составе и состоянии почв, параметрах растительности, элементах рельефа и гидросетях. Это обеспечивает построение точных цифровых карт сельскохозяйственных угодий, где каждая точка имеет координатную привязку и набор характеристик. Такой подход делает возможным изучение мелкомасштабной неоднородности плодородия, диагностику участков с признаками деградации либо, наоборот, зон с высоким производственным потенциалом. На основе этих карт разрабатываются рекомендации по рациональному размещению культур и корректировке технологий их возделывания.

#### 2. Дистанционное зондирование Земли

Технологии дистанционного зондирования предоставляют возможность получать информацию о состоянии почвенного и растительного покрова без проведения трудоёмких наземных обследований. Съёмка в разных спектральных диапазонах позволяет оценивать влажность верхних горизонтов, особенности структуры поверхности, параметры микрорельефа и состояние посевов. Радиолокационные методы особенно ценны тем, что обеспечивают стабильный поток данных при облачности и в ночное время, что делает мониторинг практически непрерывным. Благодаря этому ДЗЗ используется как инструмент оперативного контроля за динамикой агроландшафтов и уточнения почвенно-ресурсных характеристик на больших территориях.

#### 3. Сенсорные технологии и Интернет вещей

Распределённая сеть почвенных, растительных и метеорологических сенсоров осуществляет сбор информации в режиме реального времени, регистрируя параметры влажности, температуры, кислотности, содержания элементов питания, биомассы и фитосанитарного состояния посевов. Технология IoT обеспечивает автоматизированную передачу и консолидацию этих данных в едином информационном пространстве. Это создаёт основу для непрерывного контроля состояния агроэкосистем и позволяет оперативно корректировать управленческие решения в ответ на динамику почвенных и вегетационных процессов.

#### 4. Искусственный интеллект (ИИ)

Инструменты ИИ и алгоритмы машинного обучения выполняют углублённый анализ совокупных данных, выявляя скрытые закономерности и сложные причинно-следственные связи между почвенными свойствами, погодноклиматическими факторами и конечной урожайностью. Данный подход позволяет:

- осуществлять прогнозную оценку ресурсоэффективного потенциала для каждого конкретного земельного участка;
- оптимизировать агротехнологические решения, такие как дифференцированное внесение удобрений и средств защиты растений, режимы орошения и структуру севооборотов;
- автоматизировать работу с большими данными и генерировать высокоточные картограммы прогнозируемой урожайности.

#### 5. Комплексная интеграция технологий

ГИС, ДЗЗ, сенсорных сетей, IoT и ИИ формирует основу для создания комплексных цифровых двойников земельных ресурсов. Такие модели аккумулируют данные о:

- биологических, химических и физико-механических свойствах почв;
- экономических индикаторах эффективности землепользования;
- экологических и технологических лимитирующих факторах;
- прогнозируемой продуктивности и оптимальных стратегиях управления для каждого участка.

Реализация подобного интеграционного подхода ведёт к повышению точности и объективности оценки ресурсоэффективного потенциала, сокращению производственных издержек и трудозатрат, минимизации экологического ущерба. В итоге это обеспечивает возможность для своевременного принятия научно обоснованных и экономически целесообразных управленческих решений в агросфере.

#### Заключение

Устойчивое повышение плодородия почв и оценка их ресурсоэффективного потенциала являются ключевыми условиями повышения производительности агроландшафтов и обеспечения экологической стабильности землепользования. Интеграция физических, химических и биологических показателей почв с современными цифровыми технологиями, включая ГИС, дистанционное зондирование, сенсорные сети и искусственный интеллект, позволяет создавать точные и оперативные модели плодородия, что способствует рациональному использованию земельных ресурсов и устойчивому развитию сельского хозяйства.

#### Список литературы

1. Джаббаров Н. И., Мишанов А. П., Добринов А. В., Савельев А. П. Моделирование и оценка уровня

плодородия почвы [Электронный ресурс] // Вестник МГУ. — 2024. — № 3. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-otsenka-urovnya-plodorodiya-pochvy> (дата обращения: 18.11.2025).

2. Абдусаламова Р. Р., Баламирзоева З. М. Способы комплексной оценки плодородия почв сельскохозяйственных земель [Электронный ресурс] // Вестник СПИ. — 2022. — № 1 (41). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-kompleksnoy-otsenki-plodorodiya-pochv-selskochozyaystvennyh-zemel> (дата обращения: 18.11.2025).

3. Курочкин И. Н., Чугай Н. В., Кулагина Е. Ю. Оценка состояния почв по агрохимическим показателям плодородия // Тенденции развития науки и образования. — 2020. — № 60-8. — С. 48–50.

4. Пастухова Н. Д. Физико-химический и биологический анализ почвы и её плодородия в сельскохозяйственной биотехнологии. — СПб.: Университет ИТМО, 2019. — 34 с.

5. Сафонова Т. В. Модели и методика проектирования динамических объектов геоинформационной системы поддержки принятия решений для управления агропромышленным комплексом: дис. ... канд. техн. наук. — Санкт-Петербург, 2023. — 134 с.

6. Бочаров А. В. Оценка современного состояния внутреннего водоема на основе методов дистанционного зондирования на примере Ивановского водохранилища: дис. ... канд. геогр. наук. — Тверь, 2022. — 139 с.

7. Гылыджов Х. и др. Интеграция сенсорных данных для прогнозирования урожайности в точном земледелии // Образование и наука в XXI веке. — 2025. — № 63-2 (т. 2).

8. Соргутов И. В. Зарубежный опыт развития систем управления в АПК // Russian Economic Bulletin. — 2021. — Т. 4, № 4. — С. 306–310.

9. Свецкий А. В. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Сельское хозяйство. — 2022. — № 3. — С. 1–12.

УДК 544.77.032.1

Ольховка А.А.

## Синтез и исследование функциональных свойств квантовых точек на основе наночастиц перовскита

Ольховка Анна, магистр 2-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В данной работе приведены результаты исследований посвященные стабилизации перовскитных квантовых точек, а также её влиянию на их функциональные свойства. Стабилизация происходит за счет использования в синтезе поверхностно-активных веществ. В результате исследований установлена оптимальная концентрация стабилизаторов, используемых при получении перовскитных квантовых точек методом горячей инъекции.*

*Ключевые слова: квантовые точки, стабилизация, квантовый выход*

## Synthesis and investigation of the functional properties of quantum dots based on perovskite nanoparticles

Olkhovka A.A.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*This paper presents the results of research on the stabilization of perovskite quantum dots, as well as its effect on their functional properties. Stabilization occurs due to the use of surfactants in the synthesis. As a result of the research, the optimal concentration of stabilizers used in the production of perovskite quantum dots by hot injection has been established.*

*Keywords: quantum dots, stabilization, quantum output*

## Введение

В последнее время квантовые точки (КТ), достаточно новый класс соединений, начали приобретать широкую известность и находить применение во многих областях науки и техники. Квантовые точки—нанокристаллы полупроводника, размер которых варьируется от 2 до 10 нм, покрытые стабилизатором и обладающие квантово-размерным эффектом, что позволяет управлять оптическими свойствами КТ, например, меняя их размер.

Особое применение КТ нашли в оптических технологиях и электронике благодаря своим фотолюминесцентным свойствам [1-3].

Несмотря на быстрый прогресс в исследованиях, для квантовых точек вопрос стабилизации остается основной проблемой и по сей день [4].

## Экспериментальная часть

В данной работе было проведено исследование влияния концентрации стабилизаторов на люминесцентные свойства и стабильность КТ.

Для проведения исследований были синтезированы перовскитные квантовые точки (ПКТ) состава  $\text{CsPbCl}_3$  (рис.1) методом горячей инъекции в октадецене-1, в качестве стабилизаторов были выбраны олеиновая кислота и олеиламин с изначальными концентрациями 0,13 М и 0,26 М соответственно.



Рис. 1. Перовскитные квантовые точки состава  $\text{CsPbCl}_3$ .

Для исследования влияния концентрации стабилизаторов на люминесцентные свойства ПКТ были сняты спектры флуоресценции (рис.2) и спектры поглощения (рис.3) для квантовых точек, синтезированных с изначальными концентрациями стабилизаторов и с увеличенными на 20%.

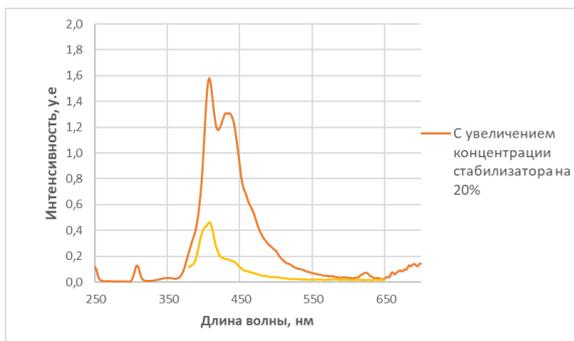


Рис. 2. Сравнение спектров флуоресценции наночастиц CsPbCl<sub>3</sub> с разной концентрацией стабилизаторов.

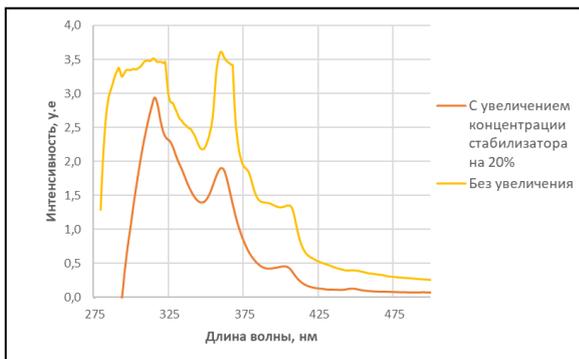


Рис. 3. Сравнение спектров поглощения наночастиц CsPbCl<sub>3</sub> с разной концентрацией стабилизаторов.

Таблица 1. Сравнение свойств перовскитных квантовых точек с разной концентрацией стабилизаторов

Значения концентраций	Квантовый выход	Время жизни
C(OA)=0,13M; C(OAm)=0,26M	15,3%	3 недели
C(OA)=0,156M; C(OAm)=0,312M	61,7%	>2 месяцев

### Обсуждение результатов

Согласно спектрам, при увеличении концентрации стабилизаторов на 20% интенсивность флуоресценции возросла примерно в 4 раза.

Также, для оценки люминесцентных свойств полученных квантовых точек была рассчитана квантовая эффективность (квантовый выход) для каждого из образцов и оценено время жизни, то есть время существования КТ и их люминесценции. Результаты исследований представлены в табл.1. При дальнейшем увеличении концентрации стабилизаторов наблюдался резкий спад времени жизни перовскитных квантовых точек, а при увеличении больше, чем на 50% образования КТ не происходило.

### Заключение

Исследование показало, что наилучшими концентрациями стабилизаторов являются C(OA)=0,156M и C(OAm)=0,312M. Дальнейшее увеличение концентрации стабилизаторов, вероятно, приводит к мгновенной коагуляции квантовых точек. Также в ходе исследования было получено существенное увеличение квантового выхода, что может найти применение в оптике и солнечной энергетике.

### Список литературы

1. Ma T. et al. The development of all-inorganic CsPbX<sub>3</sub> perovskite solar cells //Journal of materials science. – 2020. – Т. 55. – №. 2. – С. 464-479.
2. Bube R. H. Electrons in solids: an introductory survey. – Academic press, 1992.
3. Chen J. S. et al. Perovskite Nanomaterials: 0D–2D and 1D–2D Semiconductor Hybrids Composed of All Inorganic Perovskite Nanocrystals and Single-Layer Graphene with Improved Light Harvesting (Part. Part. Syst. Charact. 2/2018) //Particle & Particle Systems Characterization. – 2018. – Т. 35. – №. 2. – С. 1870006.
4. Lv W. et al. Improving the stability of metal halide perovskite quantum dots by encapsulation //Advanced Materials. – 2019. – Т. 31. – №. 28. – С. 1900682.

УДК 658.1

Криворотова С.А., Зверева О.В.

## Организационно-экономический анализ и результат бенчмаркинга деятельности двух предприятий прототипов

Криворотова Софья Андреевна – магистр 1-го года обучения; 210686@muctr.ru;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В представленной статье выполнен детальный организационно-экономический анализ и процедура сравнительного бенчмаркинга в отношении двух ключевых игроков российской химической промышленности — ПАО «ЕвроХим» и ПАО «Акрон». Основное внимание уделено их деятельности в сегменте производства карбамида (мочевины). Исследуются производственные мощности, степень вертикальной интеграции, структуру продуктового портфеля, логистические стратегии и применяемые подходы к процессно-ориентированному управлению.*

*Ключевые слова: карбамид, мочеви́на, вертикальная интеграция, процессно-ориентированное управление, бенчмаркинг, экспорт минеральных удобрений.*

## Organizational and economic analysis and benchmarking results of two prototype enterprises

Krivorotova S.A., Zvereva O.V

D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article provides a detailed organizational and economic analysis and a comparative benchmarking procedure for two key players in the Russian chemical industry: EuroChem PJSC and Akron PJSC. The focus is on their activities in the urea (carbamide) production segment. The article examines their production capacities, the degree of vertical integration, their product portfolio structure, their logistics strategies, and their approaches to process-oriented management.*

*Keywords: urea, carbamide, vertical integration, process-oriented management, benchmarking, export of mineral fertilizers.*

### Введение

Азотные удобрения, и карбамид, в частности, являются товаром стратегического значения, непосредственно влияющим на продовольственную безопасность мирового сообщества. Устойчивое лидерство России в производстве и экспорте данной продукции укрепляет ее позиции на глобальном рынке, формирует значительные валютные поступления и служит инструментом экономического влияния. Понимание механизмов, обеспечивающих эту конкурентоспособность, критически важно для выработки эффективной отраслевой политики. Мировой рынок минеральных удобрений характеризуется высокой волатильностью, связанной с ценами на энергоносители, логистическими кризисами, торговыми ограничениями и растущим спросом со стороны развивающихся сельскохозяйственных экономик. В этих условиях анализ адаптивных стратегий ключевых игроков, их способности к диверсификации рынков сбыта и оптимизации издержек является необходимым для прогнозирования рыночной конъюнктуры и выявления устойчивых конкурентных преимуществ.

Сравнение моделей «ЕвроХима» (стратегия доминирования за счет масштаба и полной вертикальной интеграции) и «Акрона» (стратегия дифференциации через глубокую переработку и специализированную логистику) представляет собой уникальный кейс для исследования современных подходов к управлению в химической промышленности [7]. Этот анализ позволяет выявить, какие факторы — контроль над ресурсами или

ориентация на добавленную стоимость — обеспечивают большую устойчивость и рентабельность в долгосрочной перспективе. Результаты исследования могут служить основой для выработки управленческих решений не только в химической отрасли, но и в других капиталоемких секторах. Понимание принципов построения эффективных производственно-хозяйственных цепочек, диверсификации продукции и оптимизации логистики имеет прикладное значение для топ-менеджмента компаний, аналитиков и инвесторов.

Таким образом, актуальность работы определяется стремлением систематизировать и осмыслить драйверы успеха российской азотной индустрии через призму сравнения двух ее лидеров, чьи разнонаправленные, но взаимодополняющие стратегии формируют основу конкурентоспособности страны на одном из важнейших мировых рынков.

### Основная часть

В течение последних лет Россия стабильно входит в число мировых лидеров по производству и экспорту карбамида (мочевины). По итогам 2023 года объем производства карбамида в стране составил около 10,5 – 11 млн тонн, что демонстрирует рост примерно на 3-4% по сравнению с 2022 годом (около 10,2 млн тонн) [1, 8]. Основная доля продукции, порядка 70-75%, поставляется на экспорт, что делает Россию ключевым игроком на глобальном рынке азотных удобрений. География экспорта обширна и включает Латинскую Америку (в первую очередь Бразилию), Западную Европу, Африку и Азию [2].

Мощности отечественных производителей позволяют полностью удовлетворять внутренний спрос сельского хозяйства, который оценивается в 2,8 – 3,2 млн тонн в год. Ключевыми игроками на этом рынке являются компании, входящие в холдинг «ЕвроХим», и ПАО «Акрон», которые не только определяют конъюнктуру на внутреннем рынке, но и являются влиятельными поставщиками на глобальной арене.

ПАО «ЕвроХим» — один из крупнейших в мире производителей минеральных удобрений, обладающий уникальной для российской химической промышленности степенью вертикальной интеграции. Компания контролирует всю цепочку создания стоимости — от добычи сырья (калийные и фосфорные руды, природный газ) до производства сложных удобрений и их логистики до конечного потребителя [3, 8, 9].

Основные виды продукции:

- Азотные удобрения (аммиачная селитра, карбамид);
- Фосфорные удобрения (аммофос, диаммофос);
- Калийные удобрения;
- Промышленные продукты (аммиак, диоксид углерода, гексаметиленитетрамин).

В контексте производства карбамида ключевыми активами компании являются «Невинномысский Азот» и «Новомосковский Азот». Суммарные мощности холдинга по производству карбамида оцениваются в более 3 млн тонн в год, что делает «ЕвроХим» абсолютным лидером в России по этому показателю.

«ЕвроХим» активно инвестирует в расширение мощностей и повышение эффективности. Стратегия компании направлена на укрепление позиций на глобальном рынке за счет контроля над издержками, что обеспечивается собственной сырьевой базой. Компания также уделяет большое внимание экологическим аспектам, внедряя технологии по снижению выбросов и повышению энергоэффективности.

ПАО «Акрон» — ведущий российский

производитель минеральных удобрений с мощной производственной базой в Великом Новгороде и стратегическим присутствием на азиатском рынке через совместное предприятие в Китае. Компания обладает значительной степенью вертикальной интеграции, включая добычу апатит-нефелиновой руды, что делает ее одним из самых эффективных производителей в своей ценовой категории [4].

Основные виды продукции:

- Азотные удобрения (карбамид, аммиачная селитра);
- Сложные удобрения (нитроаммофоска);
- Промышленная продукция (меламин, аммиак, карбамидо-формальдегидный концентрат);
- Нефелиновый концентрат (побочный продукт для алюминиевой и строительной отраслей).

Производственные мощности «Акрона» по выпуску карбамида составляют около 1,5 млн тонн в год. Производство карбамида на «Акроне» отличается ориентацией на глубокую переработку и диверсификацию. Помимо стандартных марок карбамида для сельского хозяйства, компания производит меламин и мочевино-формальдегидные концентраты, которые используются в производстве смол, клеев и ламинатов, что значительно увеличивает добавленную стоимость. Технологический процесс также включает синтез аммиака и карбамида, но с акцентом на гибкость и возможность выпуска продуктов с улучшенными потребительскими свойствами (например, менее слеживающийся карбамид).

«Акрон» делает сильный акцент на развитии логистической инфраструктуры для экспорта, включая терминалы в Усть-Луге (пропускная способность до 5 млн тонн продукции в год), что позволяет эффективно работать с зарубежными клиентами. Компания стремится к созданию продукции с высокой добавленной стоимостью, что является ее ключевым конкурентным преимуществом.

В таблице 1 представлена сравнительная характеристика основных результатов деятельности ПАО «Акрон» и предприятий по производству карбамида, входящих в холдинг «ЕвроХим».

Таблица 1 — Сравнительная характеристика ПАО «Акрон» и предприятий «ЕвроХима» по производству карбамида (данные условные, на основе открытой отчетности)

Критерий для сравнения	ПАО «ЕвроХим»	ПАО «Акрон»
Объем производства карбамида, млн т/год	2.5-3.3	1.5-2
Доля в общероссийском производстве	30%	15%
Вертикальная интеграция	Полный цикл (добыча газа, калия, фосфатов)	Высокая (добыча апатита, собственный аммиак)
Ключевые рынки сбыта	Россия, Латинская Америка, Европа, Азия	Россия, Китай, страны СНГ, Европа
Диверсификация продукции на базе карбамида	Стандартные марки (гранулированный, призматический)	Широкая: меламин, УФК, карбамид с улучшенными свойствами
Ключевой актив по карбамиду	Невинномысский Азот, Новомосковский Азот	Великоновгородский производственный комплекс
Логистическая инфраструктура	Собственные портовые терминалы (Тамань, Мурманск)	Собственный терминал в Усть-Луге, проект с Китаем

Сравнительная характеристика наглядно демонстрирует два различных подхода к построению конкурентных преимуществ [5]. Стратегия «ЕвроХима» базируется на масштабе производства и полном контроле над сырьевой цепочкой, что обеспечивает рыночное влияние через объемы и себестоимость. В свою очередь, модель «Акрона» ориентирована на создание уникальной ценности за счет диверсификации продукции и оптимизированной логистики для целевых рынков. Эти принципиальные отличия определяют различие в их операционных процессах и конечных рыночных позициях.

### Заключение

Проведенное исследование позволяет констатировать, что доминирование России на мировом рынке карбамида обеспечивается за счет синергии двух фундаментально различных, но взаимодополняющих бизнес-архитектур. «ЕвроХим» воплощает стратегию доминирования по издержкам, достигаемую за счет беспрецедентной глубины вертикальной интеграции и управления как единым производственным конвейером. Эта модель гарантирует стабильность поставок и ценовое лидерство.

В противоположность этому, «Акрон» реализует стратегию ценообразования через уникальность, где фокус смещен в сторону углубленной переработки, выпуска специализированных химикатов и формирования эффективных каналов дистрибуции для конкретных регионов. Это обеспечивает компании устойчивый спрос и повышенную маржинальность.

Обе компании являются примерами успешного применения процессно-ориентированного управления, но их акценты кардинально различаются, вытекая из их стратегического позиционирования. «ЕвроХим» оптимизирует ПХД как единый мощный механизм, где главный процесс — это непрерывная цепочка "сырье → продукт" с минимальными затратами. «Акрон» же выстраивает ПХД как сеть высокоэффективных, ориентированных на рынок бизнесов, где ключевые процессы — это "глубокая переработка" и "бесперебойная поставка" [6].

Таким образом, конкурентоспособность

отечественной отрасли азотных удобрений зиждется не на унификации, а на сосуществовании двух полюсов: модели ресурсно-производственного гиганта и модели гибкого технологического интегратора. Подобное разнообразие стратегий усиливает устойчивость сектора и позволяет гибко реагировать на вызовы глобального рынка.

### Список литературы

1. В.А. Ермолаева Производство карбамида по стриппинг-процессу / В.А. Ермолаева, А.Р. Лукмазова // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2024. т. 3-4, С. 206-210.
2. В. Н. Глухов / Химический комплекс зарубежных стран // Химия и бизнес. - 2016, -С. 98
3. Официальный сайт ПАО «Еврохим» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.eurochemgroup.com/>
4. Официальный сайт ПАО «Акрон» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.acron.ru/>
5. Соловьева Ю.Н. Конкурентные преимущества и бенчмаркинг: учебное пособие. М.: Юрайт, 2022. 139 с. 2.
6. Иванов И.Н. Экономический анализ деятельности предприятия. М.: ИНФРА-М, 2020. 348 с.
7. Критерии оценки инновационного проекта в химической промышленности / А. М. Ефимова, С. А. Рублева, О. В. Зверева, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. – 2025. – Т. 39, № 1(292). – С. 18-20.
8. Анализ изменения цен на минеральные удобрения как исходные характеристики организации производств при развитии инженерных инструментов управления российским химическим комплексом / С. В. Савинков, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, С. А. Рублева // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 13(262). – С. 123-125.
9. Савинков, С. В. Динамика развития химического комплекса Российской Федерации в современных условиях как результат базовых научно-технологических разработок / С. В. Савинков, Ю. М. Аверина, В. М. Киселев // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 2. – С. 13-19.

УДК 66.023.2

Горшков Ф.Е., Зверева О.В.

## Сравнительный анализ ресурсосберегающих характеристик реакторов идеального смешения и вытеснения для экзотермических реакций

Горшков Фёдор Евгеньевич – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,

zvereva.o.v@muctr.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье проведён сравнительный анализ реакторов идеального смешения и идеального вытеснения для экзотермических реакций. Исследованы конструктивные, кинетические и тепловые особенности аппаратов, выполнены расчёты селективности, конверсии и энергозатрат на термостабилизацию. Показано, что выбор типа реактора должен основываться на порядке целевой и побочной реакций, требуемой степени превращения и энергоэффективности процесса.*

*Ключевые слова: реактор идеального смешения, реактор идеального вытеснения, селективность, конверсия, энергозатраты, экзотермические реакции.*

## Comparative analysis of resource-saving characteristics of ideal mixing and displacement reactors for exothermic reactions

Gorshkov F.E., Zvereva O.V.

*The article provides a comparative analysis of ideal mixing and ideal displacement reactors for exothermic reactions.*

*The design, kinetic and thermal features of the devices are investigated, the calculations of selectivity, conversion and energy consumption for thermostabilization are performed. It is shown that the choice of reactor type should be based on the order of the target and side reactions, the required degree of conversion and the energy efficiency of the process.*

*Keywords: ideal mixing reactor, ideal displacement reactor, selectivity, conversion, energy consumption, exothermic reactions.*

### Введение

Выбор типа химического реактора является одной из ключевых задач при проектировании технологических процессов, особенно для высокоэкзотермических реакций. От этого выбора зависят такие показатели, как конверсия сырья, селективность целевого продукта и энергоёмкость процесса. Целью данной работы является сравнительный анализ реакторов идеального смешения (РИС) и идеального вытеснения (РИВ) на основе оценки их селективности, конверсии и энергозатрат на термостабилизацию.

### 1. Теоретическая часть

#### 1.1 Реактор идеального смешения непрерывного действия (РИС-н)

РИС представляет собой аппарат, в котором достигается полная макроскопическая однородность реакционной смеси. Конструктивно он включает [3]:

1. Мешалку для интенсивного перемешивания.
2. Систему теплообмена (рубашку или змеевик).
3. Патрубки для подачи реагентов и отвода продуктов.

Кинетической особенностью РИС является стационарность параметров: концентрации и температура одинаковы во всём объёме.

Математическое описание материального баланса для компонента А имеет вид:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{(C_{A_0} - C_A)}{W_A}, \quad (1.1)$$

где  $v_0$  – объёмный расход,  $v$  – объём реактора,  $C_{A_0}$  – исходная концентрация вещества А,  $C_A$  – текущая концентрация вещества А,  $W_A$  – скорость реакции по веществу А.

Уравнение теплового баланса:

$$\frac{T - T_0}{\tau} = \frac{Q_{xp} * r(C, T)}{C_p} + \frac{K_t * F_{уд}(T_x - T)}{C_p}, \quad (1.2)$$

где:  $Q_{xp}$  – тепловая мощность, производимая в результате реакции,

$K_t$  – коэффициент теплопередачи,

$F_{уд}$  – удельная площадь поверхности теплообмена,

$T_x$  – температура теплоносителя,

$T_0$  – температура во входном потоке,

$T$  – температура в выходном потоке,

$C_p$  – теплоёмкость,  $\tau$  – время нахождения в реакторе.

#### 1.2 Реактор идеального вытеснения периодического действия

РИВ характеризуется упорядоченным движением потока без осевого перемешивания. Конструктивно это может быть трубчатый реактор или колонна с насадкой.

Кинетический режим отличается градиентом параметров вдоль длины аппарата. Уравнение материального баланса в дифференциальной форме [3]:

$$\frac{dX_A}{dV} = \frac{W_A}{v_0 * C_{A_0}} \quad (1.3)$$

Тепловой режим осложняется пиковым тепловыделением в начальной зоне, что требует локально интенсивного охлаждения.

## 2. Практическая часть

### 2.1 Сравнение дифференциальной селективности

Проведём сравнение дифференциальной селективности на примере сложной последовательной реакции:



Скорости первой и второй стадий:  $r_1 = k_1 C_A$  и  $r_2 = k_2 C_R$ . Скорость образования целевого продукта R:  $W_R = k_1 C_A - k_2 C_R$ . Скорость общего превращения исходного вещества  $W_A = k_1 C_A$ . Дифференциальная селективность:

$$S'_R = \frac{k_1 C_A - k_2 C_R}{k_1 C_A} = 1 - \frac{k_2 C_R}{k_1 C_A} \quad (2.1)$$

где:  $k_1, k_2$  – константы скорости.

Если порядок основной реакции ниже порядка побочной, то при увеличении концентрации исходного реагента селективность снижается. В таком случае выгодно применять РИС-Н, так как концентрация исходного вещества в нём ниже, чем в РИВ.

Если порядок основной реакции выше порядка побочной, то для обеспечения высокой селективности необходимо поддерживать высокую концентрацию реагента. В этом случае лучше выбрать РИВ. Если порядки основной и побочной реакций равны, то селективность не зависит от концентрации исходного реагента, и тип реактора не влияет на селективность.

Соотношение порядков	РИВ	РИС-н
$m > n$	Высокая	Низкая
$m < n$	Низкая	Высокая
$m = n$	Постоянная	Постоянная

Источник: составлено автором на основе данных [1, 2]

#### 2.1.1 Примеры расчетов

Для расчётов, возьмём общие исходные данные для реакторов РИВ и РИС.

Жидкофазный процесс описывается сложной реакцией типа  $A \rightarrow R \rightarrow S$  с константами скоростей  $k_1 = 5 \text{ мин}^{-1}$  и  $k_2 = 1,8 \text{ мин}^{-1}$ . Исходная концентрация вещества A равна 4,8 моль/л. Объемный расход смеси равен 18 м<sup>3</sup>/ч. Рассчитать селективность по продукту R [2].

Решение:

Для РИС:

Из базового уравнения для реактора смешения для продукта R:

$$\frac{C_R + C_{R0}}{\tau} = W_R(C, T), \quad (2.2)$$

где  $w_R(C, T) = k_1 C_A - k_2 C_R$  и при условии, что  $C_{R0} = 0$ , получаем:

$$C_R = \frac{k_1 \tau C_{A0}}{(1+k_1 \tau)(1+k_2 \tau)} \quad (2.3)$$

Время пребывания реакционной массы в зоне реакции, при котором достигается максимальная концентрация промежуточного вещества R, определяется формулой:

$$\tau_{Rmax} = \frac{1}{\sqrt{k_1 \cdot k_2}} = \frac{1}{\sqrt{5 \cdot 1,8}} = 0,33 \text{ мин} \quad (2.4)$$

Определяем степень превращения вещества A:

$$x_A = \frac{k_1 \tau}{1+k_1 \tau} = \frac{5 \cdot 0,33}{1+5 \cdot 0,33} = 0,62 \quad (2.5)$$

Определяем концентрацию продукта R на выходе из реактора:

$$C_R = \frac{k_1 \tau C_{A0}(1-x_A)}{(1+k_2 \tau)} = \frac{5 \cdot 0,33 \cdot 4,8 \cdot (1-0,62)}{(1+5 \cdot 0,33)(1+1,8 \cdot 0,33)} = 1,89 \text{ моль/л} \quad (2.6)$$

Определяем селективность по продукту R:

$$S_R = \frac{C_R}{C_{A0} \cdot x_A} = \frac{1,89}{4,8 \cdot 0,62} = 0,64 \quad (2.7)$$

Для РИВ

Из базового уравнения для реактора вытеснения для продукта R:

$$\frac{C_R}{d\tau} = W_R(C, T), \quad (2.8)$$

где  $w_R(C, T) = k_1 C_A - k_2 C_R$ .

Отсюда формула  $C_R$

$$C_R = \frac{k_1 C_{A0}}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 \tau} - e^{-k_2 \tau}) \quad (2.9)$$

Определяем концентрацию продукта R на выходе из реактора

$$C_R = \frac{k_1 C_{A0}}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 \tau} - e^{-k_2 \tau}) = \frac{5 \cdot 4,8}{1,8 - 5} (e^{-5 \cdot 0,33} - e^{-1,8 \cdot 0,33}) = 2,7 \text{ моль/л} \quad (2.10)$$

Определяем селективность по продукту R

$$S_R = \frac{C_R}{C_{A0} \cdot x_A} = \frac{2,7}{4,8 \cdot 0,62} = 0,9 \quad (2.11)$$

Для последовательных реакций типа  $A \rightarrow R \rightarrow S$  предпочтительнее использовать РИВ, если целевым продуктом является промежуточное соединение R.

Вывод: РИВ обеспечивает более высокую селективность по промежуточному продукту R в последовательных реакциях, что подтверждает теоретические выводы и данные примеров [2].

### 2.2 Сравнение конверсии

Конверсия вещества в реакторе (степень превращения) в химии — это доля исходного реагента, прореагировавшего за время процесса, относительно его начального количества.

#### 2.2.1 Примеры расчетов

Проводится жидкофазная реакция первого порядка  $A \rightarrow R$  с константой скорости  $0,45 \text{ мин}^{-1}$ . Объемный расход реагента составляет 30 л/мин. Сравнить степень превращения вещества A, достигаемую в реакторе смешения и вытеснения объемом 150 л каждый [2].

Решение

Степень превращения исходного вещества для реакции первого порядка в реакторе смешения определяется формулой:

$$X_A = \frac{k\tau}{1+k\tau} \quad (2.12)$$

Степень превращения исходного вещества для реакции первого порядка в реакторе смешения определяется формулой:

$$X_A = 1 - \exp(-k\tau) \quad (2.13)$$

Определяем время пребывания как отношение объема реактора к объемному расходу реагента. Поскольку объемы реактора смешения и вытеснения равны, время пребывания в обоих реакторах будет одинаковым:

$$\tau = \frac{v_p}{V_0} = 150 / 30 = 5 \text{ мин} \quad (2.14)$$

Определяем степень превращения в реакторе смешения

$$X_a = \frac{k\tau}{1+k\tau} = \frac{0,45 \cdot 5}{1+0,45 \cdot 5} = 0,69 \quad (2.15)$$

Определяем степень превращения в реакторе вытеснения

$$X_a = 1 - \exp(-0,45 \cdot 5) = 0,89 \quad (2.16)$$

Следовательно, при проведении простой реакции в реакторе смешения и в реакторе вытеснения равных объемах степень превращения в реакторе вытеснения больше, чем в реакторе смешения. Реактор вытеснения более предпочтителен. Результаты расчёта (2.15, 2.16) наглядно демонстрируют преимущество РИВ по конверсии для реакций первого порядка, что соответствует теоретическим положениям и примерам [1, 2].

### 2.3 Сравнение энергозатрат на термостабилизацию.

РИВ характеризуются трубчатой конструкцией с высоким отношением поверхности теплообмена к объёму, что обеспечивает эффективный теплоперенос [3]. Материалы изготовления — легированные и нержавеющие стали с теплопроводностью 15–25 Вт/м·К.

РИС выполняются в виде емкостных аппаратов с мешалкой, часто с защитными покрытиями (стеклоэмаль, футеровка), имеющими низкую теплопроводность (0,1–1,2 Вт/м·К).

Вывод: Энергетические затраты на термостабилизацию в РИВ существенно ниже

благодаря применению материалов с высокой теплопроводностью и оптимальной конструкции теплообменных поверхностей.

### Заключение

На основании анализа технологических и энергетических характеристик можно сделать следующее заключение. Реактор идеального смешения демонстрирует преимущество в простоте управления температурным режимом, что делает его предпочтительным для высокоэкзотермических реакций.

Реактор идеального вытеснения обеспечивает более высокую селективность по промежуточному продукту в последовательных реакциях и более высокую степень превращения в простых реакциях. Кроме того, характеризуются значительно меньшими энергозатратами на термостабилизацию.

Выбор типа реактора должен основываться на комплексной оценке кинетических, технологических и энергетических факторов конкретного процесса.

### Список литературы

1. Бесков В. С. Общая химическая технология / В.С. Бесков. — Москва: Академкнига, 2005. — 452 с.
2. Смирнов Н.Н., Волжинский А.В. Химические реакторы в примерах и задачах. Издание второе. Под ред. Чл. Корр. АН СССР Романкова П.Г. -Л.: Химия, 1986. - 224 с.
3. Мухленов И. П. Теоретические основы химической технологии / под. ред. И.П. Мухленова 5-е изд., стер. - М.: Альянс, 2009. -256 с.

УДК 544.72, 54.057

Тотомир К.Ю., Садоян Д.Г., Березина К.П., Крючкова Т.А., Шешко Т.Ф., Чередниченко А.Г.

### Композитные каталитические системы на основе $GdCoO_3$ нанесенного на оксидные носители, для процесса углекислотной конверсии метана

Тотомир Ксения Юрьевна, студентка 2-го курса магистратуры кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Садоян Даниил Георгиевич, студент 4-го курса кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Березина Кристина Павловна, студентка 4-го курса кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Крючкова Татьяна Алексеевна, к.х.н., старший научный сотрудник кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва; [kryuchkova-ta@rudn.ru](mailto:kryuchkova-ta@rudn.ru)

Шешко Татьяна Фёдоровна, к.х.н., доцент кафедры физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Чередниченко Александр Генрихович, д.х.н., заведующий кафедрой физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва

Российский университет дружбы народов (РУДН), факультет физико-математических и естественных наук, кафедра физической и коллоидной химии, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

*Главной задачей данной работы являлось изучение влияния природы оксидных носителей ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ) и массовой доли нанесенного на носитель  $GdCoO_3$  в процессе углекислотной конверсии метана (УКМ) с получением синтез-газа. Установлено, что нанесение  $GdCoO_3$  на носители не приводит к изменению их фазового состава, однако влияет на координационное окружение ионов металлов. Показано, что каталитические характеристики систем зависят от типа носителя и содержания активной фазы. Наибольшей активностью и сбалансированным соотношением  $H_2/CO$  обладал образец с 30% масс.  $GdCoO_3$  на  $Al_2O_3$ , что связано с сильным взаимодействием между активной фазой и носителем, снижающим вероятность побочных реакций и коксообразования.*

**Ключевые слова:** перовскиты (сложные оксиды), золь-гель синтез, нанесенные катализаторы, кобальт, гадолиний, окислительная конверсия, метан, синтез-газ

### Composite catalytic systems based on $GdCoO_3$ deposited on oxide carriers for the process of carbon dioxide conversion of methane

Totomir K.Yu., Sadoyan D.G., Berezina K.P., Kryuchkova T.A., Sheshko T.F., Cherednichenko A.G.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

\*e-mail: [kryuchkova-ta@rudn.ru](mailto:kryuchkova-ta@rudn.ru)

*The main task of this work was to study the influence of the nature of oxide supports ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ) and the mass fraction deposited on the carrier  $GdCoO_3$  by the method of carbon dioxide conversion of methane. In turn, the deposition of  $GdCoO_3$  on carriers does not lead to a change in their phase composition, but it does affect the coordination environment of metal ions. It is shown that the catalytic characteristics of the systems depend on the type of carrier and the content of the active phase. The sample with 30% of the mass  $GdCoO_3$  over  $Al_2O_3$  had the highest activity and a balanced  $H_2/CO$  ratio, which is associated with a strong interaction between the active phase and the carrier, reducing the likelihood of adverse reactions and coke formation.*

**Keywords:** oxide systems perovskites (complex oxides), sol-gel synthesis, supported catalysts, cobalt, gadolinium, oxidative conversion, methane, synthesis-gas

#### Введение

В контексте глобальной стратегии устойчивого развития одной из наиболее актуальных проблем является рост концентрации парниковых газов в атмосфере, прежде всего метана и диоксида углерода, что вносит ключевой вклад в изменение климата. Перспективным методом переработки парниковых газов и снижения их негативного воздействия является углекислотная конверсия метана (УКМ) с получением синтез-газа — ценного сырья для последующего производства водорода, используемого в экологически чистых энергетических установках, например, топливных элементах [1]. Однако основной проблемой данного

процесса является быстрая деактивация катализаторов из-за коксообразования на поверхности.

Значительное внимание в научной литературе уделяется применению перовскитоподобных оксидов в качестве катализаторов для УКМ ввиду их высокой термической стабильности и регулируемой каталитической активности. Одним из путей повышения каталитической активности является использование высокопористых оксидных носителей с развитой поверхностью, которые предотвращают спекание частиц катализатора. Кроме того, носитель может играть активную роль в процессе, участвуя в диссоциативной адсорбции  $CO_2$  и переносе кислорода

к активным центрам, что способствует газификации углеродных отложений [2]. Несмотря на потенциальные преимущества, систематические исследования влияния природы носителя на свойства перовскитных катализаторов для УКМ остаются ограниченными [3].

В связи с этим, целью данной работы являлось исследование каталитической активности нанесенных систем из  $GdCoO_3$  и оксидного носителя процессе углекислотной конверсии метана, установлением влияния природы подложек на каталитические свойства в отношении получения синтез-газа углекислотной конверсией метана.

### Экспериментальная часть

#### Синтез и характеристика сложных оксидов.

Синтез сложного оксида  $GdCoO_3$  провели по адаптированному золь-гель методу [4] при мольном соотношении общего количества нитратов металлов к лимонной кислоте – 1:1. Взятые навески растворяли в небольшом количестве воды и помещали на магнитную мешалку с терморегулятором. К полученному раствору при постоянном перемешивании добавляли лимонную кислоту. После 30 минут перемешивания в раствор вводили 1,5-кратный избыток этиленгликоля по отношению к количеству лимонной кислоты. Раствор нагревали до  $80^\circ\text{C}$  и перемешивали до образования геля. Гель высушивали при температуре  $450^\circ\text{C}$  для удаления органических компонентов, а затем прокаливали при температуре  $900^\circ\text{C}$  в течение 3 часов.

Нанесенные катализаторы на основе  $GdCoO_3$  (Таблица 1) получали путем ручного измельчения в ступке смеси  $GdCoO_3$  с ранее прокаленным в муфельной печи оксидом – носителем ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $ZrO_2$ ) в массовом соотношении 10 и 30%.

Качественный анализ синтезированных сложных оксидов проводили с помощью РФА и ИК-спектроскопии. Рентгенофазовый анализ синтезированных образцов выполняли на дифрактометре Bruker Advance D8 (излучение  $CuK\alpha$ ) в интервале углов  $2\theta = 10^\circ - 70^\circ$  с шагом сканирования  $0.02046^\circ$ . Съемка проводилась в кюветках из оргстекла. Для снятия ИК-спектров образцов использовался спектрофотометр Nicolet 6700. Для анализа использовали пробы в виде порошка. Пробоподготовку проводили методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Была применена приставка, оснащённая поликристаллическим алмазом. Спектры

записывались в средней и дальней ИК-областях ( $4000-400\text{ см}^{-1}$ ).

#### Методика каталитического эксперимента.

Каталитический эксперимент осуществлялся в проточной каталитической установке в интервале температур  $773-1223\text{ K}$  при атмосферном давлении, объемная скорость реакционной смеси составляла  $0,9 - 1,0\text{ л/ч}$ . Анализ получаемой реакционной смеси осуществлялся хроматографическим методом на приборе Кристалл 5000 (насадочная колонка Porapak Q, газ-носитель – Ar,  $l - 3\text{ м}$ ,  $d - 3\text{ мм}$ ) с использованием соединенных последовательно детекторов по теплопроводности и пламенно-ионизационного. Значения конверсий и скоростей образования продуктов реакции и селективности по ним при каждой заданной температуре измерялись после достижения стационарного состояния, о котором судили по постоянству площадей хроматографических пиков, и рассчитывались на единицу массы катализатора.

#### Обсуждение результатов

Для описания фазового состава всего ряда образцов, был использован метод рентгеновской дифракции. Для качественной интерпретации полученных спектров использовали базу данных PDF2. На рисунке 1 представлены полученные дифрактограммы для всей линейки образцов. Можно заметить,

что образцы, содержащие  $GdCoO_3$ , кристаллизуются в структуре перовскита с орторомбической сингонией, о чем свидетельствует 100% пик в области  $2\theta \approx 33,9^\circ$ .

Чистый  $Al_2O_3$  находится в метастабильной  $\alpha$ -фазе, что подтверждается наличием основных дифракционных пиков при  $2\theta \approx 38^\circ, 44^\circ, 52,5^\circ, 66,5^\circ$  [5]. Для  $SiO_2$  зафиксирован характерный пик при  $2\theta \approx 26^\circ$ , соответствующий кристобалитной модификации диоксида кремния. Подложка  $ZrO_2$  представлена моноклинной фазой, с характерными дифракционными максимумами при  $2\theta \approx 28,2^\circ, 31,5^\circ, 50,1^\circ$  и  $59,8^\circ$  [6].

При сравнении всех нанесенных образцов четко видно сохранение исходной фазовой структуры как подложек, так и активной фазы перовскита при их совместном присутствии. На дифрактограммах нанесенных катализаторов не наблюдается появления новых дифракционных линий, что свидетельствует об отсутствии химического взаимодействия между компонентами системы.

Таблица 1. Обозначения и состав исследуемых образцов

Полное название образца	Сокращенное название образца	Полное название образца	Сокращенное название образца
$GdCoO_3$	GCO	30% нанесенного $GdCoO_3$ на $Al_2O_3$	30GCO/A
$Al_2O_3$	A	10% нанесенного $GdCoO_3$ на $SiO_2$	10GCO/S
$SiO_2$	S	10% нанесенного $GdCoO_3$ на $SiO_2$	30GCO/S
$ZrO_2$	Z	10% нанесенного $GdCoO_3$ на $ZrO_2$	10GCO/Z
10% нанесенного $GdCoO_3$ на $Al_2O_3$	10GCO/A	10% нанесенного $GdCoO_3$ на $ZrO_2$	30GCO/Z

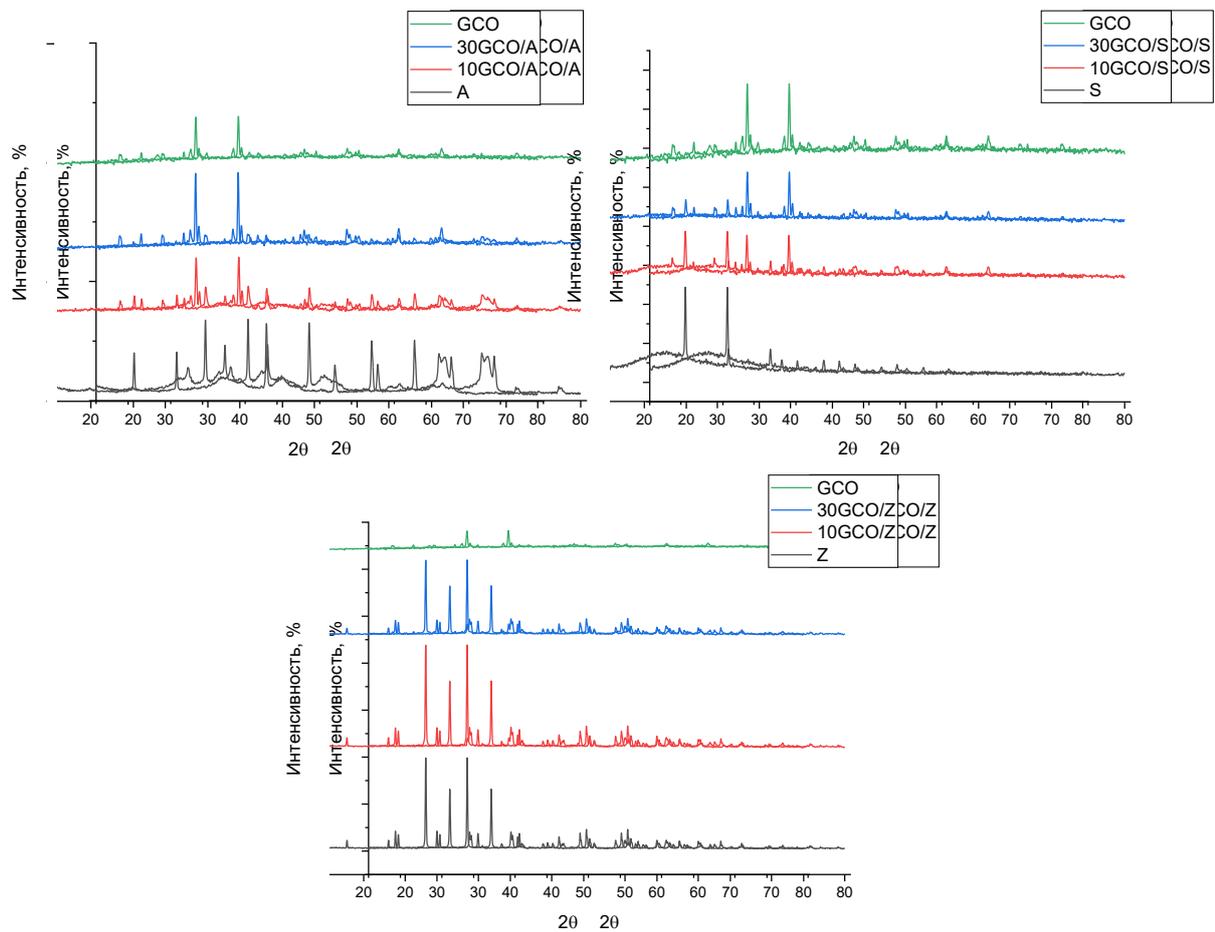


Рис. 1. Дифрактограммы чистых оксидов – носителей, GCO и нанесенных образцов

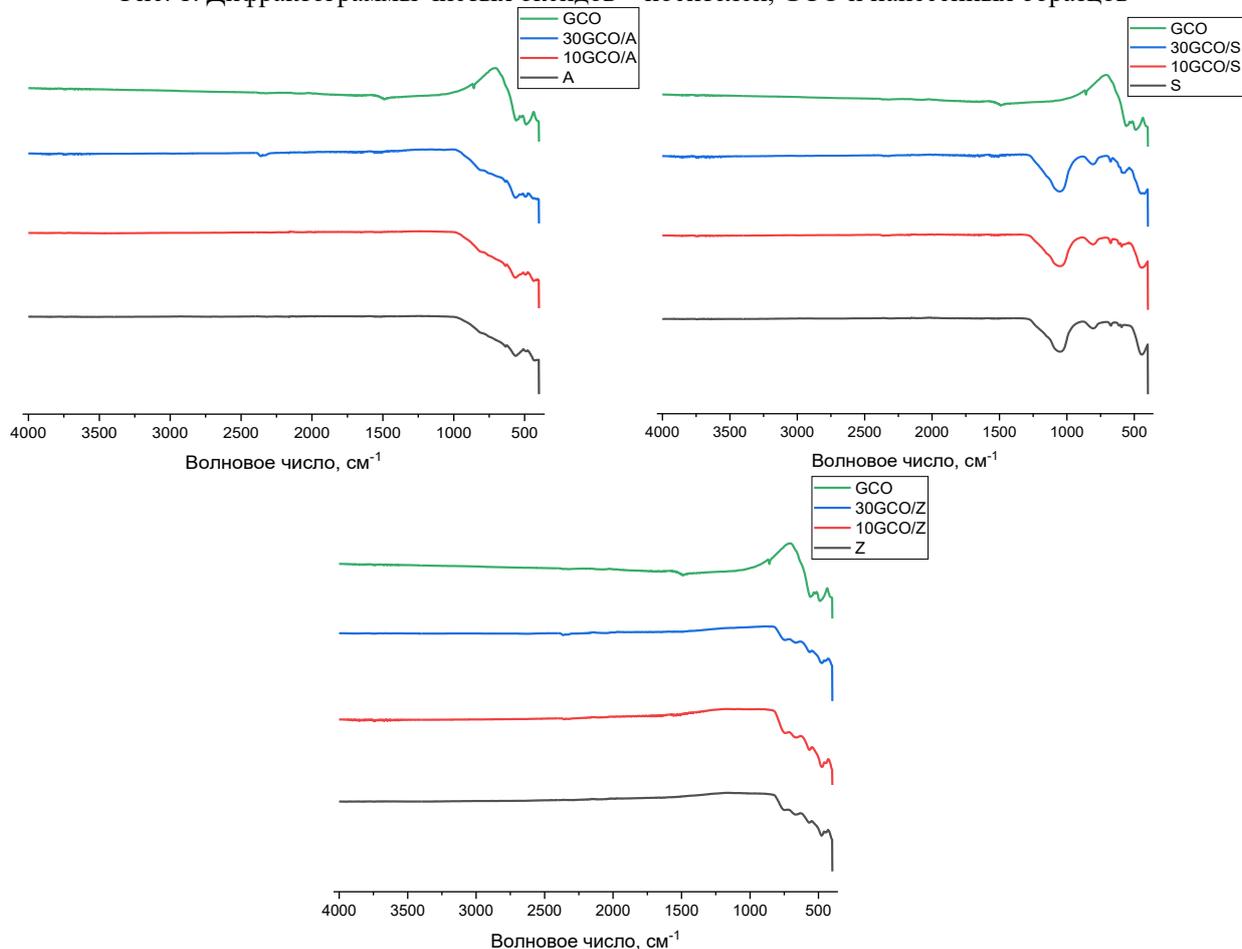


Рис. 2. ИК-спектры исследуемых образцов

Взаимодействие между активной фазой и материалом подложки можно наблюдать на основании отмечаемых изменений в положении и интенсивности полос при нанесении GCO на подложки, представленных на рисунке 2.

Исследование функциональных групп проводилось в интервале длин волн от  $4000\text{ см}^{-1}$  до  $400\text{ см}^{-1}$ . О наличии связей Co-O, O-Co-O и Gd-O-Co свидетельствуют полосы поглощения при  $\sim 560\text{ см}^{-1}$ ,  $\sim 660\text{ см}^{-1}$  и  $\sim 500\text{ см}^{-1}$ , соответственно. В случае чистого оксида алюминия четко видны основные полосы в диапазоне  $500\text{--}800\text{ см}^{-1}$ , относящиеся к колебаниям решетки Al-O. Кроме того, присутствует полоса около  $600\text{ см}^{-1}$ , связанная с деформационными колебаниями  $AlO_6$  октаэдров [7]. У  $SiO_2$  доминирует широкая полоса в районе  $1100\text{ см}^{-1}$ , отвечающая за асимметричные растяжения связи Si-O-Si, а также полосы при  $\sim 790$  и  $\sim 470\text{ см}^{-1}$ , соответствующие деформационным колебаниям Si-O [8]. Для оксида циркония характерны полосы в области  $500\text{--}700\text{ см}^{-1}$ , связанные с колебаниями решетки Zr-O. Пик около  $650\text{ см}^{-1}$  связан с асимметричными растяжениями связей Zr-O-Zr и указывает на наличие моноклинной фазы ZrO<sub>2</sub>.

При нанесении GCO на оксидные носители наблюдаем изменения в ИК-спектрах. В случае

10GCO/A и 30GCO/A в сравнении с чистым GCO наблюдается частичное смещение полосы  $\sim 650\text{ см}^{-1}$  в область более высоких волновых чисел, что может свидетельствовать о модификации координационного окружения  $Co^{3+}$  вследствие взаимодействия с поверхностью  $Al_2O_3$ , а интенсивность этой полосы снижается с увеличением содержания GCO [9]. Для 10GCO/S и 30GCO/S имеет место частичное смещение характерной полосы, что может указывать на небольшую степень взаимодействия между GCO и подложкой. В то же время, несмотря на сохранение характерных полос для обоих компонентов в 10GCO/S и 30GCO/S, интенсивность полосы перовскита уменьшается с увеличением массовой доли GCO, что вероятно, обусловлено частичным разрушением или деформацией кристаллической структуры кобальтита гадолиния при нанесении на частично кристаллическую матрицу  $SiO_2$  [10]. Для 10GCO/Z и 30GCO/Z также отмечено снижение интенсивности полосы  $\sim 650\text{ см}^{-1}$ , которая в чистом оксиде циркония соответствует деформационным колебаниям связей Zr-O-Zr и может указывать на частичное замещение  $Zr^{4+}$  на  $Co^{3+}$  или химическое взаимодействие между подложкой и нанесённым GCO, что приводит к изменению локального окружения ионов металлов [9].

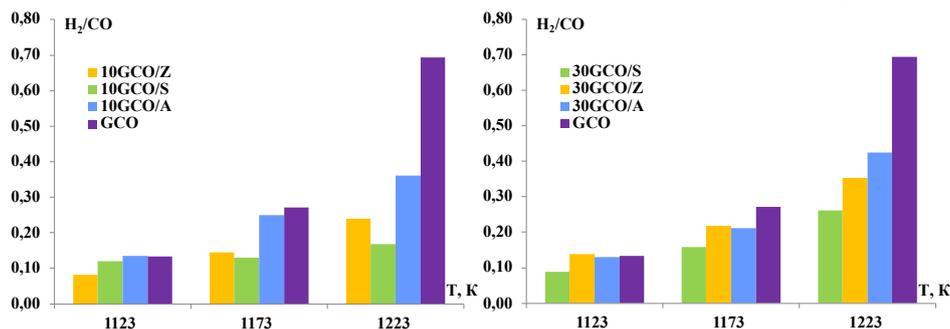


Рис. 3. Соотношение синтез-газа для нанесенных образцов

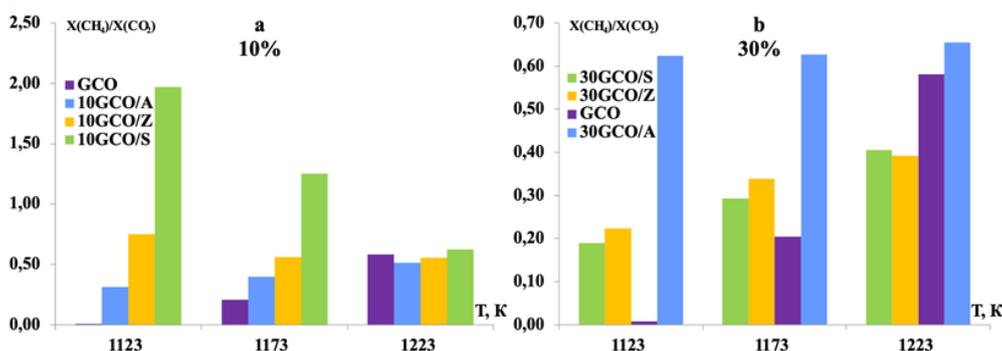


Рис. 4. Соотношение конверсий для нанесенных образцов

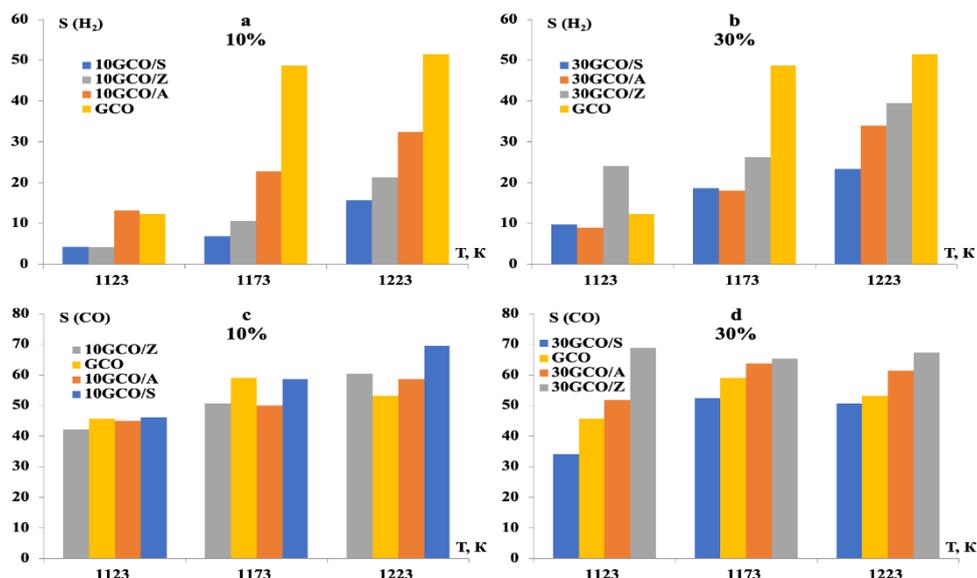


Рис. 5. Значения селективностей по водороду (а и б) и по монооксиду углерода (с и д) для разных носителей

Сравнивая данные, представленные на рисунке 3, можно отметить, что соотношение  $H_2/CO$  для всех нанесённых образцов кобальтита гадолиния оставалось относительно низким и не превышало значения 0,5. Это указывает на преобладание побочных процессов таких, как разложение метана и реакция Будуара протекающих, параллельно с основной реакцией углекислотной конверсии метана.

В то же время, анализ зависимости соотношения компонентов синтез-газа от природы подложки показал следующую тенденцию:

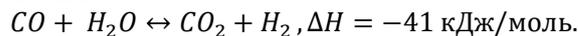
- Наиболее высокие значения соотношения  $H_2/CO$  наблюдались у образцов, нанесённых на  $Al_2O_3$ , так для образца 30GCO/A при температуре 1223 К соотношение достигло 0,42, что свидетельствует о наиболее сбалансированном выходе водорода и монооксида углерода. Такое поведение может быть связано с более сильным взаимодействием активной фазы с подложкой, что способствует стабилизации каталитически активных центров и снижает вероятность протекания побочных реакций.

- Наименьшие значения были зафиксированы для образцов на  $SiO_2$ : максимальное значение для 30GCO/S составило всего 0,26 при 1223 К.

- Промежуточные значения соотношения  $H_2/CO$  характерны для образцов на  $ZrO_2$ : при увеличении массовой доли катализатора до 30% наблюдалось возрастание данного параметра, и максимальное значение 0,35 было достигнуто при 1223 К. Однако даже в этом случае соотношение оставалось ниже, чем у  $Al_2O_3$ , что говорит о менее равномерном распределении продуктов реакции.

Таким образом, влияние подложки на соотношение  $H_2/CO$  проявляется следующим образом:  $Al_2O_3 > ZrO_2 > SiO_2$ , где оксид алюминия обеспечивает наиболее благоприятные условия для получения сбалансированного синтез-газа, а  $SiO_2$  — наибольшее отклонение от стехиометрии из-за интенсивного протекания побочных реакций.

Из рисунка 4 можно заметить, что значения соотношений конверсий метана и диоксида углерода не превышают 0,8, что показывает протекание наряду с основной реакцией, побочного процесса обратной паровой конверсии CO, согласно нижеприведенному уравнению.



Четкой корреляции между природой носителя и долей нанесенного кобальтита выявлено не было, но следует отметить достижение максимального значения конверсий из всей линейки было на образце 30GCO/A — около 0,7, что может свидетельствовать о незначительном протекании побочного процесса на данном образце.

Сравнение селективностей по водороду и монооксиду углерода для образцов с различной массовой долей нанесенного кобальтита, представленных на рисунке 5, позволяет судить о влиянии количества нанесенной активной фазы на распределение продуктов реакции в высокотемпературной области протекания реакции углекислотной конверсии метана.

Нанесенный GCO характеризуется значительным ростом селективности по водороду с увеличением температуры — от 12% при 1123 К до 51% при 1223 К. При этом селективность по CO также оставалась высокой — 59% при 1223 К, что указывает на относительно равномерное распределение продуктов основной реакции. Однако эффективность этого образца была ограничена из-за интенсивного образования углеродных отложений, которые могут снижать доступность активных центров и снижать стабильность катализатора.

Нанесение 10% весовых GCO на  $Al_2O_3$  привело к постепенному увеличению селективности по водороду, достигающему 32% при 1223 К, тогда как селективность по CO возросла до 59%, сохраняя баланс между продуктами реакции. Увеличение содержания GCO до 30% весовых способствовало дальнейшему повышению селективности по  $H_2$  (до

34%) и CO (до 61%) при той же температуре, что говорит о возрастании каталитической активности и уменьшении влияния побочных процессов.

В случае  $\text{SiO}_2$  влияние увеличения массовой доли катализатора на селективность выражено слабее. Для образца 10GCO/S значения селективности по  $\text{H}_2$  оставались крайне низкими — не более 12% при 1223 К, а по CO — умеренными, на уровне 24%. Увеличение содержания GCO до 30% привело лишь к частичному повышению селективности по водороду (до 23%), при этом выход CO остался невысоким (51%), что не позволило достичь уровня активности, наблюдаемого на других подложках.

Для образцов, нанесённых на  $\text{ZrO}_2$  установлено положительное влияние увеличения массовой доли катализатора на селективность по обоим продуктам. Так, для 10GCO/Z селективность по  $\text{H}_2$  выросла с 4% до 21%, а по CO — с 42% до 60% при повышении температуры до 1223 К. Образец 30GCO/Z показал ещё более высокие значения — 40% по  $\text{H}_2$  и 67% по CO при 1223 К, что делает его одним из наиболее перспективных по сочетанию селективности и стабильности.

#### Заключение

Комплексный анализ полученных данных физико-химического анализа и каталитических экспериментов показал, что природа используемых подложек существенно влияет на свойства катализатора. Нанесённый  $\text{GdCoO}_3$  обладает высокой начальной активностью, однако склонен к закоксовыванию. При этом нанесение на носитель снижает степень углеродных отложений и повышает стабильность системы. Кроме того, выявлено, что увеличение массовой доли  $\text{GdCoO}_3$  в системе приводит к возрастанию каталитической активности. При этом образец 30GCO/A демонстрирует наибольшую каталитическую активность, обеспечивая высокие конверсии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , а также сбалансированное соотношение  $\text{H}_2/\text{CO}$ , что делает его наиболее перспективным для получения синтез-газа в ходе реакции углекислотной конверсии метана.

#### Список литературы

1. Stagg-Williams S. M., Noronha F. B., Fendley G., Resasco D. E.  $\text{CO}_2$  reforming of  $\text{CH}_4$  over  $\text{Pt}/\text{ZrO}_2$

catalysts promoted with La and Ce oxides // *J. Catal.* – 2000. – №194 – P. 240-249.

2. Su Y. J., Pan K. L., Chang M. B. Modifying perovskite-type oxide catalyst  $\text{LaNiO}_3$  with Ce for carbon dioxide reforming of methane // *Int. J. Hydrogen Energy* – 2014. – №39 – P. 4917-4925.

3. Rivas M. E., Fierro L. G., Goldwasser M. R., Pietri E., Perez-Zurita M. J., Griboval-Constant A., Leclercq G. Structural features and performance of  $\text{LaNi}_{1-x}\text{Rh}_x\text{O}_3$  system for the dry reforming of methane // *Appl. Catal. A: Gen.* – 2008. – №344 – P. 10-19.

4. Chagas C. A., Toniolo F. S., Magalhaes R. N. S. H., Schmal S. Alumina-supported  $\text{LaCoO}_3$  perovskite for selective CO oxidation (SELOX) // *Int. J. Hydrogen Energy* – 2012. – №37 – P. 22-31.

5. Mohammed A. A., Khodair Z. T., Khadom A. A. Preparation and investigation of the structural properties of  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles using the Sol-Gel method // *Chemical Data Collections* – 2020. – №29.

6. Mangla O., Roy S. Monoclinic zirconium oxide nanostructures having tunable band gap synthesized under extremely non-equilibrium plasma conditions // *Proceedings* – 2018. – №3 – P. 10.

7. Toledo R. R., Santoyo V. R., Sanchez, C. D. M., Rosales M. M. Effect of aluminum precursor on physicochemical properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  by hydrolysis/precipitation method // *Nova Sci.* – 2018. – №10 – P. 83-99.

8. Dong R., Wang L., Zhu J., Liu L., Qian Y. A novel  $\text{SiO}_2\text{-GO/acrylic resin}$  nanocomposite: fabrication, characterization and properties // *Applied Physics A.* – 2019. – №125 – P. 8.

9. Kumar J. V., Venkatesh K., Sudhakaran M. S., Karuppasamy P., Alotaibi K. M., Krishnan N. P., Karupiah C., Yang C., Ramaraj S. K. Simple construction of gadolinium cobaltite perovskite ( $\text{GdCoO}_3$ ): Unveiling the dynamic electrode potential for pseudocapacitors // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* – 2024. – №57.

10. Wang J., Wang P., Wu Z., Yu T., Abudula A., Sun M., Ma X., Guan G. Mesoporous catalysts for catalytic oxidation of volatile organic compounds: preparations, mechanisms and applications // *Rev. Chem. Eng.* – 2023. – №39 – P. 541-565.

УДК 630\*114.4:631.417.2:504.5

Стародубцева Н.Ю., Журавлева О.С.

### Анализ современных методов учета гумификации при оценке лесных угодий

Стародубцева Надежда Юрьевна – студентка группы МТ-17, кафедры логистики и экономической информатики; nadya.starodubseva@mail.ru.

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики. ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», zhuravleva.o.s@muctr.ru.

*В статье рассмотрены современные подходы к оценке лесных угодий южной тайги с учётом процессов гумификации дерново-подзолистых почв. Показано, что показатели гумификации являются важным критерием экологического состояния лесных экосистем, отражая степень их устойчивости, способность к восстановлению и эффективность биогеохимических циклов. На основе анализа особенностей формирования гумуса в условиях южной тайги обоснована необходимость включения гумусовых характеристик — запаса органического вещества, мощности гумусового горизонта, качественных параметров гумуса и степени разложения подстилки — в систему оценки лесных угодий. Предложен концептуальный подход, позволяющий повысить объективность мониторинга лесных территорий и улучшить качество принимаемых решений в сфере устойчивого лесопользования.*

*Ключевые слова: лесные угодья южной тайги, гумификация, дерново-подзолистые почвы, гумусовый горизонт, оценка состояния лесных экосистем, органическое вещество почвы, устойчивое лесопользование.*

### Analysis of modern methods of accounting for humification in the assessment of forest lands

Starodubtseva N.Yu., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article considers modern approaches to the assessment of forest lands of the southern taiga, taking into account the processes of humification of sod-podzolic soils. It is shown that humification indicators are an important criterion of the ecological state of forest ecosystems, reflecting the degree of their stability, the ability to restore and the effectiveness of biogeochemical cycles. Based on the analysis of the features of humus formation in the conditions of the southern taiga, the necessity of including humus characteristics — the reserve of organic matter, the thickness of the humus horizon, the qualitative parameters of humus and the degree of decomposition of litter — in the forest lands assessment system is substantiated. A conceptual approach is proposed to increase the objectivity of monitoring forest areas and improve the quality of decisions made in the field of sustainable forest management.*

*Keywords: forest lands of the southern taiga, humification, sod-podzolic soils, humus horizon, assessment of forest ecosystems, soil organic matter, sustainable forest management.*

#### Введение

Особую актуальность приобретает оценка состояния лесных угодий южной тайги в условиях, изменения климата, усиливающегося антропогенного воздействия и снижения устойчивости лесных экосистем. Большая часть лесных земель этого региона представлена дерново-подзолистыми почвами [1], которые отличаются слабой структурой, высокой чувствительностью к изменениям в лесорастительных условиях и низким содержанием органического вещества [2]. Они формируются в основном под смешанными и хвойными лесами на водно-ледниковых и ледниковых отложениях. Для этих почв характерны наличие подзолистого горизонта, чёткая дифференциация профиля и относительно тонкий гумусовый слой. В таких почвах гумус представлен в основном фульвокислотами, что объясняется кислой реакцией среды и интенсивным выщелачиванием, также он беден на минеральные соединения. Мощность гумусового горизонта зачастую небольшая — от нескольких сантиметров до 10–15 см, что отражает их сильную зависимость от биоклиматических условий и ограниченность процессов гумификации.

Дерново-подзолистые почвы отличаются повышенной низкой емкостью поглощения,

кислотностью и слабой обеспеченностью элементами питания. Во многом эти особенности определяют чувствительность южнотаёжных экосистем к антропогенным воздействиям. Даже небольшое нарушение лесного покрова приводит к снижению содержания органического вещества, усилению подзолообразования и ухудшению структуры гумуса. И, как следствие, гумусовые характеристики там становятся одним из наиболее информативных индикаторов стабильности экосистемы. Уменьшение запасов гумуса или ухудшение его качества нередко свидетельствует о нарушении круговорота веществ, деградации почв и снижении способности леса к естественному восстановлению.

Так как гумус является основным стабилизатором биологических, химических и физических свойств этих почв, ключевым индикатором их состояния становятся процессы гумификации. Она определяет способность лесных почв поддерживать питательный режим, собирать и накапливать углерод, регулировать водный баланс и обеспечивать биопродуктивность лесных биогеоценозов.

Традиционные подходы к оценке лесных угодий зачастую не учитывают динамику гумификации и состояние гумусового горизонта [3], хотя именно эти характеристики определяют потенциал

восстановления лесов и экологическую устойчивость, чем как раз и обусловлена актуальность исследования. В южной тайге, где почвы подвержены выщелачиванию, структурным нарушениям и дегумусированию, для объективного анализа их состояния необходимо включение показателей гумификации в систему оценки лесных угодий.

Цель исследования является обоснование показателей гумификации как критерия качества лесных угодий и анализ современных подходов к оценке территорий леса южной тайги с учётом процессов гумификации дерново-подзолистых почв.

Задачи исследования:

1. охарактеризовать особенности процессов гумификации в дерново-подзолистых почвах под лесом;
2. выявить как показатели гумификации отражают состояние лесных угодий;
3. рассмотреть современные подходы к оценке лесных территорий и определить, как они могут быть дополнены гумусовыми характеристиками;
4. предложить основанную на показателях гумификации концептуальную модель оценки лесных угодий.

#### **Анализ подходов к оценке лесных угодий в контексте процессов гумификации**

Оценка лесных угодий обычно опирается на степень полноты, характеристику древостоя, возрастные особенности, продуктивность биомассы, состояние подлеска, подроста и лесной подстилки. Однако эти параметры не всегда отражают глубинное состояние лесных экосистем, так как важные изменения часто происходят в почвенном профиле [4]. Для южной тайги это особенно важно, так как дерново-подзолистые почвы имеют бедные гумусовые формы, слабый гумусовый горизонт и повышенную кислотность, из-за чего они становятся чувствительными к нарушениям.

В этих почвах процессы гумификации развиваются постепенно. Формирующийся гумус представлен в основном фульвокислотами, которые характеризуются высокой подвижностью [5]. Это обуславливает большую зависимость гумусового состояния от лесорастительных условий и антропогенных воздействий, а также низкую стабильность его слоя. В лесах южной тайги интенсивность гумификации определяется участием хвойных и мелколиственных пород, активностью грибных сообществ, составом лесной подстилки, температурным режимом и сезонной влажностью. При этом показатели гумификации могут служить важным критерием оценки лесных угодий. Среди них наиболее информативными и полезными являются: запас гумуса в верхнем горизонте, соотношение гуминовых и фульвокислот как показатель степени стабильности гумусовых структур, мощность гумусового горизонта, степень разложения подстилки, содержание органического углерода, а также характеристики структуры гумусовых веществ. Эти показатели позволяют оценить, насколько лесная экосистема способна поддерживать биогеохимический цикл и сохранять устойчивость.

Современные подходы к оценке лесных угодий южной тайги всё чаще обращаются к интегративным моделям, учитывающим взаимодействие древостоя, подстилки и почвенного слоя [6]. Включение гумусовых показателей (Таблица 1) в систему диагностики состояния лесных угодий является одним из перспективных направлений, особенно в зонах активной хозяйственной деятельности. Таким образом, оценка леса по гумификации позволяет определить потенциал восстановления продуктивности, выявить степень деградации почвенного покрова, сформировать объективные выводы о состоянии лесного биогеоценоза и оценить динамику накопления и увеличения органического углерода.

*Таблица 1. Показатели гумификации, которые используются для оценки состояния лесных угодий*

Показатель гумификации	Содержание показателя	Экологическое значение для оценки лесных угодий
Запас гумуса (органического вещества)	Количество гумуса в верхнем горизонте почвы (г/кг, т/га)	Характеризует уровень почвенного плодородия, обеспеченность леса элементами питания, способность экосистемы поддерживать биогеохимические циклы
Мощность гумусового горизонта	Толщина слоя гумусированной почвы (см)	Отражает степень развития почвы, устойчивость к деградации, чувствительность к выщелачиванию и эрозионным процессам
Соотношение гуминовых и фульвокислот	Соотношение основных фракций гумуса	Показывает стабильность гумусовых веществ; низкие значения (<1) характерны для дерново-подзолистых почв и указывают на низкую устойчивость лесных экосистем
Содержание органического углерода	Доля органического углерода в почве (%)	Индикатор состояния органического вещества; связан с поглощающей способностью почвы, продуктивностью леса и устойчивостью экосистемы
Степень разложения лесной подстилки	Классы разложения растительных остатков, структура подстилки	Отражает интенсивность текущих процессов гумификации, активность почвенной биоты и скорость обновления органического вещества
Качественные характеристики гумуса	Ароматичность, подвижность фракций, степень окисленности	Характеризуют зрелость и устойчивость гумусовых структур; используются для экологической оценки состояния лесных почв

Связь между состоянием леса и гумификацией проявляется в зависимости лесной растительности от свойств гумусового горизонта. Доступность элементов питания снижается при низком уровне гумификации, в том числе ухудшается структурно-агрегатное состояние почвы и активность почвенной биоты, а подвижность токсичных элементов повышается [7]. В связи с этим происходит сокращение биомассы подлеска, ослабление древостоя, снижение природоохранной ценности лесных угодий и изменение состава подроста. Следовательно, если включить показатели гумификации в оценку лесных угодий, то это позволит не только фиксировать текущее состояние, но и прогнозировать будущее развитие экосистемы.

Таким образом, комплексный подход к оценке лесных угодий южной тайги должен учитывать показатели гумификации как базовый элемент экологической диагностики. Он обеспечивает более точное понимание устойчивости экосистемы, состояния почвенного покрова, уровня экологических рисков и восстановительного потенциала. Внедрение комплексного подхода и расширение спектра показателей к анализу гумусовых характеристик создают основу для принятия научно-обоснованных решений, направленных на сохранение их ресурсного потенциала и экологической устойчивости, и объективного мониторинга южнотаёжных лесов.

#### Заключение

Анализ показывает, что показатели гумификации дерново-подзолистых почв должны быть включены в оценку лесных угодий южной тайги, поскольку именно они определяют функциональное состояние и устойчивость лесных экосистем. Если традиционные лесоустроительные подходы дают лишь внешнюю характеристику лесных массивов, то почвенно-гумусовые показатели позволяют выявить скрытые процессы восстановления или деградации. Гумификация является важным индикатором экологического качества лесных угодий, так как отражает интенсивность биогеохимических процессов, динамику органического вещества и способность лесной экосистемы поддерживать продуктивность. Включение показателей

гумификации в оценку лесных угодий позволяет улучшить достоверность оценки состояния лесных земель, совершенствовать системы мониторинга, и способствует формированию устойчивых стратегий охраны экосистем и лесопользования.

#### Список литературы

1. Анализ внутрисезонной динамики содержания органического углерода в пахотной дерново-подзолистой почве / В. П. Самсонова, Т. В. Локалина, М. И. Кондрашкина, С. Е. Дядькина // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2025. – Т. 80, № 3. – С. 22-29.
2. Organic matter content and humus reserves in natural soils of Rostov agglomeration / P. N. Skripnikov, S. N. Gorbov, O. S. Bezuglova, S. S. Tagiverdiev // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. – 2022. – Vol. 14, No. 4. – P. 185-199.
3. Пространственная организация пор в темносерой почве со вторым гумусовым горизонтом (томографический анализ) / Е. Б. Скворцова, К. Н. Абросимов, В. Н. Щепотьев, В. Н. Дмитренко // Почвоведение. – 2021. – Т. 55, № 9. – С. 1133-1142.
4. Malysh, N. A. The impact of recreation on the forest ecosystem / N. A. Malysh, E. O. Trunova // Оригинальные исследования. – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 40-45.
5. Колчанова, К. А. Сорбция фульвокислоты на подфракциях ила, выделенных из минеральных горизонтов торфянисто-подзолисто-глеватой почвы / К. А. Колчанова, И. И. Толпешта, Ю. Г. Изосимова // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2024. – № S1. – С. 37-72.
6. Об агрофизических свойствах почвенного слоя / Н. В. Долгополова, Е. В. Мальшева, А. В. Нагорных [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 7. – С. 18-25.
7. Синхротронное излучение для исследования трансформации токсичных элементов в системе “почва–растение” (обзор) / В. С. Цицуашвили, Т. М. Минкина, А. В. Солдатов, Д. Г. Невидомская // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2021. – № 8. – С. 41-50.

УДК 631.4

Купчук Д.А., Журавлева О.С.

## Обзор инновационных моделей и алгоритмов управления плодородием почв

Купчук Дарья Александровна – студент 1-го курса магистратуры кафедры логистики и экономической информатики; [dasha.kupchuk@yandex.ru](mailto:dasha.kupchuk@yandex.ru).

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

*В статье рассмотрены основные проблемы управления плодородием почв, включая снижение содержания органического вещества, потерю питательных элементов и неоднородность почвенных условий. Проведён анализ возможностей применения моделей Romul\_Hum, RothC и EPIC для решения выявленных задач, а также показано, каким образом моделирование позволяет повышать точность прогнозов, обосновывать агротехнологические решения и обеспечивать устойчивое использование почвенных ресурсов.*

*Ключевые слова:* плодородие почв, Romul\_Hum, RothC, EPIC, органическое вещество, модели управления плодородием почв, агротехнологии.

## Review of Innovative Models and Algorithms for Soil Fertility Management

Kupchuk D.A., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses the key challenges in soil fertility management, including the decline in organic matter content, nutrient loss, and spatial heterogeneity of soil conditions. It provides an analysis of the applicability of the Romul\_Hum, RothC, and EPIC models for addressing these issues and demonstrates how modeling improves prediction accuracy, supports agritechnological decision-making, and enables the sustainable use of soil resources.*

*Keywords:* soil fertility, Romul\_Hum, RothC, EPIC, organic matter, soil fertility management models, agritechnologies.

### Введение

Управление плодородием почв представляет собой одну из ключевых задач современного аграрного сектора и устойчивого развития. Плодородие почв является ключевым компонентом устойчивого сельскохозяйственного производства и глобальной продовольственной безопасности. В последние десятилетия наблюдается усиливающаяся деградация почв, вызванная эрозией, истощением органического вещества, потерь питательных элементов и иными антропогенными воздействиями [1]. Согласно последнему докладу ФАО, темпы деградации земель во многих регионах в десятки раз превышают скорость восстановления почв, что ставит под угрозу будущую продуктивность агроландшафтов.

При этом традиционные методы управления плодородием — такие как плановое внесение удобрений и периодический агрохимический анализ — часто оказываются недостаточно адаптированы к пространственной неравномерности почв и динамическим процессам перераспределения элементов питания. Эти подходы не отражают сложную биогеохимическую природу процессов в почве и не позволяют своевременно корректировать агротехнологию в ответ на изменения условий.

В контексте указанных проблем возникает потребность в математических и компьютерных моделях, способных описывать процессы накопления и потери органического вещества, трансформацию углерода и азота, влияние удобрений и севооборота. Особенно важны процессно-ориентированные модели, которые с помощью уравнений материального баланса моделируют потоки углерода

и питательных элементов в системе «почва–растение–атмосфера» [2]. Модели такого рода, как EPIC, уже хорошо известны в литературе: их можно сочетать с данными дистанционного зондирования для повышения точности прогноза урожайности [3].

Другой важный аспект — оценка органического углерода почвы с помощью моделей, таких как RothC. Эта модель позволяет смоделировать разложение органического вещества и прогнозировать динамику углеродных пулов в зависимости от климата, текстуры почвы и растительного покрова [4].

Цель настоящей статьи — проанализировать ключевые проблемы управления плодородием почв и рассмотреть, как инновационные модели могут быть применены для их решения. Для этого необходимо:

— Выявить основные современные вызовы в управлении плодородием почв, включая деградацию, баланс углерода и элементов питания;

— Рассмотреть концептуальные основы и функциональные возможности выбранных процессно-ориентированных моделей;

— Показать, каким образом применение этих моделей может помочь в прогнозировании динамики плодородия и оптимизации агротехнологий;

— Обсудить ограничения моделей и перспективы их применения в аграрной практике.

### Проблемы и вызовы управления плодородием почв

Плодородие — это способность почв удовлетворять потребность растений в питательных веществах и воде [5]. Показатели, определяющие уровень плодородия почвы, делят на прямые,

оказывающие непосредственное влияние на рост и физиологическое состояние растений, и косвенные, воздействующие опосредованно. К группе прямых факторов относят обеспеченность культур доступной влагой, аэрацию, реакцию среды, а также количество и форму поступающих питательных элементов и пропорции между ними. Косвенные факторы включают в себя численность и активность почвенной микробиоты, глубину расположения плотных горизонтов, ограничивающих развитие корневой системы, и особенности обработки почвы. Оба типа условий тесно взаимосвязаны и совместно определяют конечную продуктивность агроэкосистем.

Плодородная почва характеризуется целым комплексом свойств:

Способностью естественным образом разлагать и нейтрализовывать загрязняющие вещества, включая остатки пестицидов;

Устойчивым биологическим равновесием, обеспечивающим стабильность и саморегуляцию экосистемы;

Постоянством свойств, защитой от выщелачивания и выдувания посевного материала вместе с верхним слоем грунта;

Способностью микрофлоры бороться с патогенными микроорганизмами.

Управление плодородием почв в российских агроэкосистемах сталкивается с рядом серьезных вызовов, среди которых ключевым является деградация земель. В последние десятилетия фиксируется уменьшение гумусового слоя и снижение содержания органического вещества — процессы, приводящие к ухудшению структуры почвы, снижению влагоудерживающей способности и падению биологической активности [6].

Антропогенные формы деградации, такие как эрозия и техническое нарушение почвенного покрова, усиливают потерю плодородия. Эрозионный вынос поверхностного слоя особенно опасен: без эффективной мелиорации и противоэрозионных мер восстановление верхних горизонтов может быть крайне затруднено [7]. Одновременно дегумификация — снижение гумусового содержания — усиливается из-за недостаточного применения устойчивых агротехнических практик [6].

Мониторинг плодородия почв в России пока остаётся недостаточным. Агрохимическое обследование почв (включая паспортизацию земель) проводится нерегулярно, что препятствует отслеживанию долгосрочных изменений состава почвы [8]. Наряду с этим, наблюдается рост доли кислых почв и снижение содержания гумуса, что свидетельствует о системном ухудшении агрохимического состояния земель.

Экономические барьеры существенно усложняют внедрение мер по восстановлению плодородия. Потери гумуса и снижение плодородия приводят к прямому экономическому ущербу: изменение гумусового слоя и деградационные изменения почв могут приводить к значительному снижению

стоимости земли [9]. Более того, восстановительные мероприятия требуют дополнительных затрат, что делает их менее привлекательными для многих землепользователей, особенно без системы стимулов или государственной поддержки.

Кроме того, агротехническая практика остаётся недостаточно ориентированной на долгосрочное сохранение плодородия: глубокая вспашка, частая обработка почвы и несбалансированное внесение минеральных удобрений приводят к ускоренному расходованию органического вещества и нарушению естественной почвенной динамики [10]. Также важную роль играет потеря целостности ландшафтной структуры: эрозия верхнего слоя и отсутствие защитных лесополос усиливают деградацию, и восстановление таких систем требует значительных времени и ресурсов [11].

Все вышеописанные проблемы — деградация гумуса, эрозионные потери, недостаток мониторинга, экономическая неэффективность восстановительных практик и агротехнологии, не ориентированные на долгосрочность — формируют многомерную задачу управления плодородием. Для её решения необходим комплексный подход: именно поэтому модели, способные прогнозировать динамику органического вещества, значения питательных элементов становятся инструментом, который может помочь преодолеть существующие ограничения и выстроить стратегию устойчивого управления почвенным ресурсом.

#### **Модели управления плодородием почв: типология и характеристика**

Главная задача модели заключается в учёте и систематизации всех элементов объекта, что позволяет в дальнейшем анализировать их взаимное влияние на плодородие почв. Такая модель предназначена для отображения работы почвенной системы как открытой многокомпонентной структуры, собирая максимально возможное количество количественных и качественных характеристик [12].

Процессно-ориентированные модели органического вещества почв являются фундаментальным инструментом для прогнозирования динамики углерода и азота в почве и разработки стратегий управления плодородием. Эти модели описывают взаимосвязь между поступлением органического материала, его разложением, гумификацией и потерями через дыхание и другие пути. Моделирование — один из немногих способов количественно оценить, как почва реагирует на изменения климата и землепользования, а также предсказывать долгосрочные тенденции углеродного баланса и устойчивости системы.

Модель Romul\_Hum (версия модели ROMUL), представляет собой процессную модель, описывающую трансформацию (минерализацию и гумификацию) почвенного органического вещества в зависимости от его химических свойств и погодных условий почвы и формирование устойчивого гумуса в

лесной подстилке. При этом она учитывает химический состав опада, гидротермические условия и активность почвенной биоты — всё это влияет на скорости гумификации и минерализации [13].

Данная версия также определяет вклад почвенной фауны в процесс гумусообразования при сохранении прежней структуры и значений основных параметров. Модель Romul\_Hum вычисляет скорость гумификации и минерализации неорганического количества когорт опада разного качества под влиянием всей почвенной биоты, оценивая при этом запасы углерода и азота в органогенных слоях (L, F, H) и органо-минеральных горизонтах (лабильный и стабильный гумус). Главными факторами, определяющими динамику процессов, выступают гидротермические условия, гранулометрический состав почвы и химические свойства опада и почвы, включая соотношение C:N [14].

Валидация модели проведена на основе многолетних полевых измерений в подмосковных лесах: расчёты по Romul\_Hum показали хорошее соответствие измеренным данным почвенного дыхания, запасам углерода и отношению C:N в разных слоях почвы [15].

Тем не менее, в модели отмечены ограничения: Romul\_Hum не моделирует «сверхстабильные» пулы органического вещества, такие как пирогенный углерод или углерод глубоких горизонтов, что может приводить к недооценке долгосрочной устойчивости некоторых почвенных систем [14].

Модель RothC предназначена для описания цикла органического углерода в верхнем слое автоморфных минеральных почв. Она учитывает влияние типа почвы, температуры, влажности и растительного покрова на процессы круговорота углерода с помесечным шагом. В основе модели лежит количественное представление ключевых почвенных процессов. Органический углерод в RothC разделён на четыре активных пула — легкоразлагаемый растительный материал, более устойчивые растительные остатки, микробную биомассу и гумифицированное органическое вещество, различающиеся по скорости трансформации, а также один неактивный пул, содержащий инертный органический углерод [16].

В Российских исследованиях RothC применяют для оценки секвестрации углерода в пахотных почвах: расчёты показывают, что при реалистичных сценариях земледелия (внедрение ресурсосберегающих практик) возможно значительное накопление органического углерода в пахотных верхних горизонтах.

При этом чувствительность модели к климатическим условиям (температура, влажность) и агротехнологиям (возврат органики, вспашка и др.) является одним из ключевых факторов, влияющих на прогноз секвестрации.

Модель EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) была создана для анализа влияния факторов почвенной продуктивности на рост растений. Она представляет собой имитационную

модель, позволяющую исследовать развитие растительности с учётом доступных почвенных и водных ресурсов, а также погодных условий. Расчёты в модели выполняются с помесечным или дневным шагом, что обеспечивает возможность ежедневного контроля параметров растительности параллельно с натурными измерениями. Полученные значения параметров растительности могут сопоставляться с реальными данными, измеренными в тот же день, включая показатели, получаемые методами дистанционного зондирования, например, листовым индексом (LAI).

Благодаря минимальному числу необходимых входных параметров EPIC позволяет рассчитывать ключевые характеристики растительности ежедневно, что даёт возможность их сопоставления как с наземными измерениями, так и с результатами дистанционного зондирования. Дата начала уборки культур определяется на основе двух критериев: прекращение прироста сухой биомассы и снижение листового индекса до нуля [17].

Рассмотренные модели — Romul\_Hum, RothC и EPIC — представляют собой разные, но взаимодополняющие инструменты для анализа и управления плодородием почв. Каждая из них имеет свою специализацию: Romul\_Hum позволяет прогнозировать разложение органического вещества и формирование гумуса в лесных экосистемах с учётом биоты и гидротермических условий; RothC обеспечивает количественную оценку динамики органического углерода в пахотных почвах и анализ потенциала секвестрации углерода при различных агротехнологиях; EPIC объединяет агроэкосистемный подход, учитывая рост растений, водный режим, потери питательных веществ и углеродный баланс, с возможностью ежедневного мониторинга и сопоставления с данными дистанционного зондирования.

Применение этих моделей позволяет выявлять ключевые факторы, влияющие на плодородие почв, прогнозировать последствия изменений климата и землепользования, а также разрабатывать адаптивные рекомендации по управлению удобрениями, поливом и севооборотом. Для высокой точности прогнозов необходимо корректное формирование исходных данных, калибровка моделей и интеграция с системами ГИС и дистанционного зондирования. В совокупности использование этих моделей обеспечивает научно обоснованную поддержку принятия решений по устойчивому управлению почвенными ресурсами.

### **Применение моделей Romul\_Hum, RothC и EPIC для решения проблем управления плодородием почв**

Управление плодородием почв сталкивается с рядом ключевых проблем: деградацией органического вещества, потерями питательных элементов, пространственной и временной неоднородностью почв, ограниченностью наблюдательных данных и неопределённостью

прогнозов. Использование инновационных моделей управления плодородием позволяет научно обоснованно подходить к решению этих задач.

Модель Romul\_Hum помогает преодолевать проблему деградации органического вещества, прогнозируя процессы разложения растительных остатков и формирования гумуса в лесных и смешанных экосистемах. Она учитывает влияние состава почвенной биоты, химических характеристик опада и гидротермических условий, что позволяет определить, при каких условиях сохраняется или накапливается органическое вещество. Это даёт возможность корректировать лесопользование и меры восстановления почв, минимизируя потери гумуса и обеспечивая долгосрочную устойчивость почвенной системы.

Модель RothC решает проблему прогнозирования потерь и накопления углерода в пахотных почвах. Она позволяет оценивать эффективность различных агротехнологий и севооборотов с точки зрения секвестрации углерода, сохранения органического вещества и снижения эрозионных и питательных потерь. Таким образом, RothC способствует принятию решений о рациональном внесении органических удобрений, возврате растительных остатков и выборе технологий обработки, что снижает деградацию почвы и повышает её продуктивность.

Модель EPIC позволяет решать проблему пространственной и временной неоднородности почвенных ресурсов. С её помощью можно ежедневно отслеживать рост растений, водный режим, потери питательных элементов и углеродный баланс на различных участках поля. При интеграции с дистанционным зондированием и данными ГИС это позволяет адаптировать агротехнологии под конкретные условия, снижая неопределённость и повышая точность управления. EPIC особенно полезна для оперативного управления агроэкосистемами: она даёт рекомендации по поливу, внесению удобрений и срокам уборки, минимизируя потери ресурсов и поддерживая устойчивость почвенной системы.

Совместное использование этих моделей позволяет комплексно решать проблемы управления плодородием: Romul\_Hum — для долгосрочной оценки накопления органики и гумусообразования, RothC — для прогнозирования углеродного баланса и оптимизации агротехнологий, EPIC — для оперативного контроля растительности, питательных веществ и водного режима. В совокупности они обеспечивают научно обоснованное принятие стратегических и тактических решений, повышая устойчивость почвенной системы и эффективность использования земельных ресурсов.

### Заключение

Устойчивое управление плодородием почв остаётся одной из ключевых задач современного земледелия и лесного хозяйства, напрямую влияя на продовольственную безопасность, сохранение

экосистем и климатическую стабильность. Проблемы деградации почв, потери органического вещества и питательных элементов требуют комплексного подхода, сочетающего агротехнические меры, мониторинг и прогнозирование.

Применение инновационных моделей управления, таких как Romul\_Hum, RothC и EPIC, демонстрирует значительный потенциал для решения этих задач. Они позволяют строить количественно обоснованные сценарии, оценивать последствия различных стратегий землепользования и принимать управленческие решения на основе объективных данных. В перспективе интеграция таких моделей с цифровыми платформами, геоинформационными системами и современными методами анализа больших данных открывает возможности для создания эффективной системы управления почвенными ресурсами, способствующей устойчивому развитию сельского хозяйства и сохранению природных экосистем.

### Список литературы

1. Добровольский, Г. В. Деградация почв – угроза глобального экологического кризиса / Г. В. Добровольский // Век глобализации. – 2008. – № 2. – С. 54-65.
2. Рыжкова, И. М. Современное развитие моделей динамики органического вещества почв (обзор) / И. М. Рыжкова, В. А. Романенков, В. М. Степаненко // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2024. – № 4. – С. 122-129.
3. Брыксин, В. М. Модели такого рода, как EPIC, уже хорошо известны в литературе: их можно сочетать с данными дистанционного зондирования для повышения точности прогноза урожайности. / В. М. Брыксин // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 2. – С. 20-26.
4. Metrikaitytė Gudelė, G., & Sužiedelytė Visockienė, J. (2025). Quantifying Soil Carbon Sequestration Potential Through Carbon Farming Practices with RothC Model Adapted to Lithuania. *Land*, 14(7), 1497.
5. Ильясова, К. У. Плодородие почвы / К. У. Ильясова, А. П. Алпысбаева, А. К. Алимбекова // Вестник науки и образования. – 2015. – № 1 (3). – С. 9-10.
6. Хазиев, Ф. Х. Почва и экология / Ф. Х. Хазиев // Вестник академии наук РБ. – 2017. – Т. 24, № 3 (87). – С. 29-38.
7. Лешан, И. Ю. Деградация почв и земель / И. Ю. Лешан, И. Н. Брехова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 8-2. – С. 68-70.
8. Корягина, Н. В. Мониторинг плодородия земель сельскохозяйственного назначения / Н. В. Корягина, Н. Ю. Улицкая // Нива Поволжья. – 2014. – № 2 (31). – С. 22-27.
9. Степанова, Л. П. Агроэкологическая роль паспортизации черноземных почв в оценке их

деградационных изменений / Л. П. Степанова, Е. А. Коренькова // Вестник аграрной науки. – 2018. – № 1 (70). – С. 22-29.

10. Плодородие и обработка почвы / М. Н. Чернышева, С. С. Балабанов, Н. И. Картамышев, В. Ю. Тимонов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. – Т. 5, № 5. – С. 48-51.

11. Белюченко, И. С. Деградация почв и роль лесополос в мелиорации земель / И. С. Белюченко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 110. – С. 814-835.

12. Имашова, С. Н. Основные принципы агроэкологического моделирования почвенных процессов / С. Н. Имашова, А. В. Рамазанов // Актуальные проблемы современной науки: состояние, тенденции развития. – Черкесск : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

"Северо-Кавказская государственная академия", 2022. – С. 187-190.

13. Тебенькова, Д. Н. Влияние лесоводственных мероприятий на почвенный углерод: обзор / Д. Н. Тебенькова, Д. В. Гичан, Ю. Н. Гагарин // Вопросы лесной науки. – 2022. – Т. 5, № 4. – С. 1-37.

14. Шанин, В. Н. Всегда ли искусственное лесовосстановление может быть лесоклиматическим проектом? / В. Н. Шанин, П. В. Фролов, В. Н. Коротков // Вопросы лесной науки. – 2022. – Т. 5, № 2. – С. 37.

15. Применение математических моделей ROMUL и Romul\_Num для оценки эмиссии CO<sub>2</sub> и динамики органического вещества в серой лесной почве под листовым лесом в Южном Подмоскowie / И. В. Припутина, С. С. Быховец, П. В. Фролов [и др.] // Почвоведение. – 2020. – № 10. – С. 1262–1275.

16. Карты потенциала секвестрации почвенного углерода в пахотных почвах России / В. А. Романенков, Ю. Л. Мешалкина, А. Ю. Горбачева [и др.] // Почвоведение. – 2024. – № 5. – С. 677–692.

УДК 544.72, 54.057

Анисимова Ю.А., Багзина Д.Д., Крючкова Т.А., Братчикова И.Г., Шешко Т.Ф., Чередниченко А.Г.

### Модификация $GdCoO_3$ протонированием для селективного гидрирования монооксида углерода в $C_2$ – $C_4$ олефины

Анисимова Юлия Александровна, студентка 4-го курса кафедры Физической и коллоидной химии РУДН; Багзина Дарья Дмитриевна, студентка 4-го курса кафедры Физической и коллоидной химии РУДН; Крючкова Татьяна Алексеевна, к.х.н., старший научный сотрудник кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Братчикова Ирена Геннадьевна, к.х.н., доцент кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва; Шешко Татьяна Фёдоровна, к.х.н., доцент кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва; Чередниченко Александр Генрихович, д.х.н., заведующий кафедрой Физической и коллоидной химии РУДН. ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН), 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

*В работе исследована каталитическая активность перовскита  $GdCoO_3$ , модифицированного методом кислотного протонирования. Модификация проводилась обработкой предшественника  $Gd_{0,95}K_{0,05}CoO_3$  1 М раствором HCl с последующей промывкой и сушкой, что привело к замещению ионов  $K^+$  на  $H^+$ . В реакции гидрирования монооксида углерода протонированный катализатор  $H-GdCoO_3$  показал увеличение конверсии и снижение скорости образования  $CO_2$  по сравнению с исходным образцом. Наблюдался рост селективности образования легких олефинов  $C_2$ – $C_4$ . Результаты демонстрируют эффективность кислотного протонирования для создания селективных катализаторов синтеза легких олефинов из  $C_1$ -сырья.*

*Ключевые слова: перовскит  $GdCoO_3$ , кислотное протонирование, гидрирование, легкие олефины, селективность, катализ.*

### Modification of $gdcoo_3$ by protonation for the selective hydrogenation of carbon monoxide to $C_2$ – $C_4$ olefins

Anisimova Y.A., Bagzina D.D., Kryuchkova T.A., Bratchikova I.G., Sheshko T.F., Cherednichenko A.G.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*The catalytic activity of the perovskite  $GdCoO_3$  modified by acid protonation was investigated. The modification was carried out by treating the precursor  $Gd_{0,95}K_{0,05}CoO_3$  with a 1 M HCl solution followed by washing and drying, which led to the replacement of  $K^+$  ions with  $H^+$ . In the carbon monoxide hydrogenation reaction, the protonated catalyst  $H-GdCoO_3$  showed an increase in conversion and a more than 10-fold decrease in the rate of  $CO_2$  formation compared to the original sample. An increase in the selectivity for the formation of light  $C_2$ – $C_4$  olefins was observed. The results demonstrate the effectiveness of acid protonation for creating selective catalysts for the synthesis of light olefins from  $C_1$  feedstock.*

*Keywords: perovskite  $GdCoO_3$ , acid protonation, hydrogenation, light olefins, selectivity, catalysis.*

#### Введение

В современной химической промышленности наблюдается растущий интерес к разработке эффективных катализаторов для различных процессов, включая гидрирование оксидов углерода. Особое внимание уделяется изучению влияния различных факторов на активность и селективность данных катализаторов, одним из которых является протонирование. Этот процесс может существенно изменить физико-химические свойства катализаторов и повысить их эффективность в катализируемых реакциях, что делает исследования в этой области актуальными и необходимыми для оптимизации промышленных процессов.

Среди перспективных катализаторов особое место занимают перовскитоподобные оксиды. Эти материалы привлекают внимание своей уникальной структурой, которая позволяет стабилизировать смешанные степени окисления и необычные окислительные состояния в кристаллической решетке, что значительно расширяет их каталитические возможности [1-3]. Около 90% элементов периодической таблицы способны

образовывать структуру перовскита, а возможность частичной замены катионов в позициях А и В позволяет синтезировать многокомпонентные перовскиты с заранее заданными характеристиками [1].

Одним из перспективных направлений исследования перовскитных катализаторов является их модификация, в частности, протонирование. Введение ионов водорода может повлиять на поверхностные свойства катализатора, повысив его активность и устойчивость, что открывает новые возможности для разработки эффективных катализаторов для экологически чистых процессов синтеза и получения синтетического топлива.

Протонированные формы перовскитоподобных оксидов являются привлекательными объектами исследований благодаря своим интересным и уникальным свойствам. Они изучались как проводники протонов, фотокатализаторы и исходные материалы для дальнейших превращений [4]. Протонированные формы уже используются в качестве прекурсоров для дальнейших реакций катионного обмена, топохимической конденсации, интеркаляции и

присоединения, модификации промежуточных слоев и отслаивания [5].

#### Экспериментальная часть

Синтез сложнооксидного перовскита состава  $Gd_{1-x}K_xCoO_3$  ( $x = 0,5$ ) проводили согласно цитрат-нитратной методике золь-гель технологии при атмосферном давлении [6]. Сперва в деионизированной воде растворяли навеску моногидрата лимонной кислоты, которая является хелатирующим агентом, в мольном соотношении всех металлов к лимонной кислоте = 1:2. Затем после ее растворения добавляли навески солей  $Gd(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ ,  $KNO_3$ ,  $Co(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ . Контролировали кислотность раствора ( $pH=6,5$ ) с помощью водного раствора аммиака. При непрерывном перемешивании на магнитной мешалке при температуре  $\sim 60^\circ C$  добивались удаления воды с образованием геля, который в дальнейшем высушили при температуре  $200^\circ C$ . Затем производили прокалывание полученного порошка в муфельной печи в течение восьми часов при температуре  $800^\circ C$ .

Протонирование образца  $Gd_{1-x}K_xCoO_3$  ( $x = 0,5$ ) осуществлялось водным раствором  $HCl$  (1 моль/л) при комнатной температуре. Для этого навеску порошка (0,5 г) помещали в 100 мл раствора соляной кислоты и перемешивали в течение 24 часов при комнатной температуре. Контроль процесса осуществлялся измерением  $pH$  с использованием  $pH$ -метра "Эксперт-001". Далее образец центрифугировали, промывали дистиллированной водой и сушили в эксикаторе над  $SiO_2$  в течение 48 часов. Оценка степени протонирования образцов производилась с помощью термогравиметрического анализа на приборе Netzsch STA 449 F5 Jupiter.

Методом РФА был изучен структурный состав образцов на дифрактометре Bruker Advance D8 (излучение  $CuK\alpha$ ) в диапазоне углов  $2\theta = 5^\circ - 80^\circ$ . Положение и ширину пиков на полувысоте определяли обработкой РФА-спектров при использовании программы OriginPro2023.

Образец  $Gd_{1-x}K_xCoO_3$  ( $x = 0,5$ ) и его протонированная форма были проанализированы на ИК-Фурье спектрофотометре Nicolet 6700 (ЦКП ФХИ РУДН). Пробы были подготовлены в виде порошка и прошли пробоподготовку методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с использованием приставки, оснащённой поликристаллическим алмазом. Запись спектров проводилась в средней и дальней области ИК-спектроскопии (4000–400 см<sup>-1</sup>).

Изучение каталитической активности и селективности катализаторов  $GdCoO_3$ ,  $H-GdCoO_3$  проводили при атмосферном давлении и соотношении газов  $CO, H_2$  ( $CO: H_2 = 1:2$ ) в интервале температур 295–723K в проточной каталитической установке с хроматографическим анализом реактантов (Кристалл 5000.1). Реакцию проводили при скорости потока газовой смеси  $\sim 1,5$  л/час.

#### Обсуждение результатов

Установление фазового состава образцов  $GdCoO_3$  и  $H-GdCoO_3$ , полученных по золь-гель технологии, осуществлялось методом рентгенофазового анализа

образцов. Кристаллические фазы были идентифицированы с использованием базы PDF2. Рентгенофазовый анализ подтвердил, что кислотное протонирование не разрушает основную перовскитную структуру  $GdCoO_3$ . Оба образца, исходный и протонированный ( $H-GdCoO_3$ ), кристаллизуются в орторомбической сингонии (пространственная группа  $Pbma$ ). Однако протонирование приводит к характерным изменениям микроструктуры: наблюдается уменьшение среднего размера кристаллитов (с  $\sim 23$  нм до  $\sim 19$  нм) и незначительное сжатие кристаллической решетки (объем элементарной ячейки уменьшился с  $206,7 \text{ \AA}^3$  до  $204,9 \text{ \AA}^3$ ). Эти изменения являются прямым следствием замещения крупных ионов калия ( $K^+$ ) на протоны ( $H^+$ ) в структуре предшественника  $Gd_{0,95}K_{0,05}CoO_3$ . Полученные данные свидетельствуют о стабилизации перовскитного каркаса и модификации его дефектного строения в результате протонирования, что создает структурные предпосылки для изменения каталитических свойств.

Результаты инфракрасной спектроскопии образцов  $GdCoO_3$  и  $H-GdCoO_3$  представлены на рисунке 1. В ИК-спектрах обоих образцов в области  $400-700 \text{ см}^{-1}$  наблюдаются характерные полосы поглощения, соответствующие валентным колебаниям связей в каркасе перовскитной структуры. Ключевым отличием спектра модифицированного образца  $H-GdCoO_3$  является наличие интенсивной широкой полосы в области  $3000-3600 \text{ см}^{-1}$ , характерной для валентных колебаний O-H в гидроксильных группах ( $\nu(OH)$ ), и полосы при  $\sim 1320 \text{ см}^{-1}$ , которая соответствует деформационным колебаниям  $\delta(O-H)$ , что подтверждает успешное внедрение протонов в структуру. Одноатомные лиганды, где металлы координируются с атомами O, производят характерные ИК полосы поглощения  $2250-1700 \text{ см}^{-1}$  (M–N валентные колебания) и  $800-600 \text{ см}^{-1}$  (M–N деформационные колебания).

Определение степени протонирования проводили с помощью термогравиметрического анализа. Кривая ТГ (рисунок 1) показывает отчетливую стадию потери массы начиная с  $90^\circ C$ , которое объясняется дегидратацией частично протонированного соединения [8].

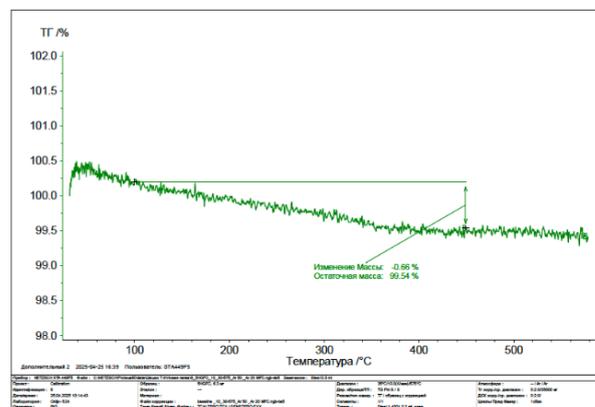
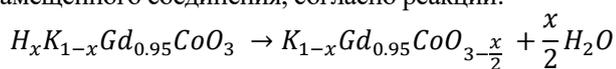


Рис. 1. Кривая потери массы образца  $H-GdCoO_3$

Стадии потери массы при нагревании образца происходят в результате высвобождения воды, которая образовалась в результате процесса разложения замещенного соединения, согласно реакции:



Данные ТГА о потере массы образцов в течение стадий обезвоживания были использованы для расчета состава полученных соединений и степени протонирования, которая, в среднем, составила ~ 80 %.

Для изучения влияния протонирования на конверсию оксидов углерода и селективность по определенным продуктам в реакции гидрирования были проведены опыты с исследуемыми образцами  $GdCoO_3$ ,  $H-GdCoO_3$  в реакции совместного гидрирования оксидов углерода при различных соотношениях  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ :  $CO:H_2=1:2$  (0%  $CO_2$ );  $CO_2:H_2=1:2$  (100%  $CO_2$ ), а также после восстановительной обработки свежих образцов. Для начала были рассмотрены температурные зависимости конверсий монооксида углерода при использовании в качестве катализаторов образец  $GdCoO_3$ , его восстановленную и протонированную формы в реакции его гидрирования (рисунок 2).

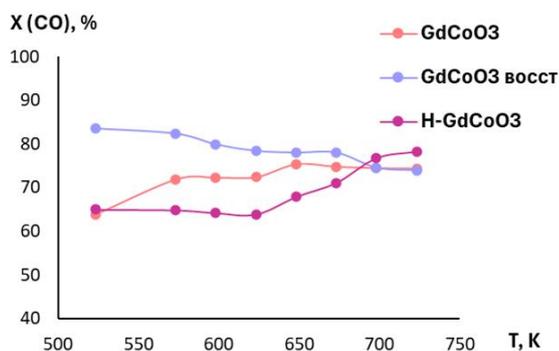


Рис. 2. Температурная зависимость конверсии монооксида углерода на образце  $GdCoO_3$ , его восстановленной и протонированной формах

Гидрирование монооксида углерода при любых условиях катализа сопровождается образованием  $CO_2$ . Ранее в работах лаборатории катализа кафедры физической и коллоидной химии было показано, что на сложных оксидах  $GdFeO_3$ , адсорбция  $CO$  протекает преимущественно на А-центрах перовскита [7] с образованием карбонатных комплексов  $Gd_2O_2CO_3$ , а образование  $CO_2$  происходит в результате распада этих комплексов при повышении температуры. Присутствие  $CO_2$  среди продуктов реакции также может быть связано и с протеканием побочной реакции Белла-Будуара  $2CO \leftrightarrow C + CO_2$ , и с взаимодействием адсорбированной молекулы  $CO_{ads}$  с кислородом перовскита ( $O_s$ ) либо с кислородом, образующимся в результате диссоциативной адсорбции  $CO$ .

Скорость образования  $CO_2$  на кобальтите гадолиния имела достаточно большие значения (таблица 1), что может быть связано с большим количеством поверхностного углерода на катализаторе, большой адсорбцией  $CO$  и быстротой протекания побочных реакций.

Таблица 1. Скорость образования диоксида углерода при температуре 723 К на образцах  $GdCoO_3$ ,  $H-GdCoO_3$

R ( $CO_2$ ), ммоль/ (г*ч)	
$GdCoO_3$	11,2
$GdCoO_3$ (восст)	15,2
$H-CoFeO_3$	0,9

Предположительно, снижение скорости образования  $CO_2$  в протонированной форме связано с изменением кислотно-основных свойств поверхности и возможным подавлением глубокой окислительной активности катализатора. Протоны могут участвовать в стабилизации поверхности, уменьшая количество активного решеточного кислорода ( $O_s$ ), либо затруднять его участие в реакциях с  $CO_{ads}$ , что снижает вклад поверхностного окисления  $CO$  в образование  $CO_2$ .

На протяжении всего каталитического эксперимента основными продуктами синтеза, помимо диоксида углерода, являлись углеводороды  $C_1-C_6$ . На рисунке 3 представлено распределение продуктов, полученных при температуре 723 К в процессе гидрирования монооксида углерода с использованием образца  $GdCoO_3$ , его восстановленной и протонированной форм.

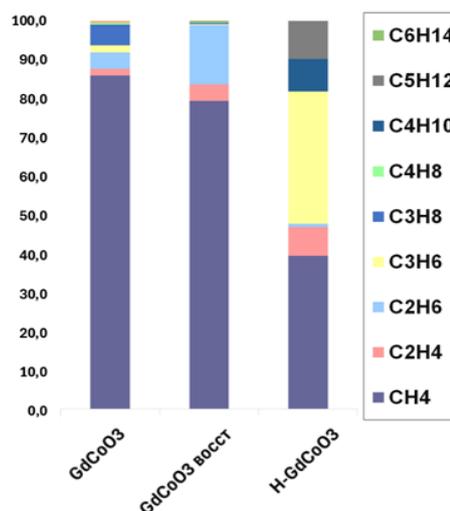


Рис. 3. Распределение продуктов гидрирования монооксида углерода на образцах  $GdCoO_3$ , его восстановленной и протонированной форм ( $T=723$  К)

Анализ состава продуктов демонстрирует, что основными компонентами являются метан, лёгкие олефины (этилен, пропилен, бутен), соответствующие алканы (этан, пропан, бутан), а также более тяжёлые углеводороды.

Расчет селективности по основным целевым продуктам (рисунок 4) - этилену и пропилену - показывает, что для  $GdCoO_3$  ее заметный рост наблюдается только после протонирования. Восстановление оказывает минимальное влияние. Наиболее высокие значения селективности по легким олефинам (до ~30%) достигаются на протонированных образцах, что подтверждает эффективность введения протонов в структуру перовскитов для повышения выхода лёгких олефинов.

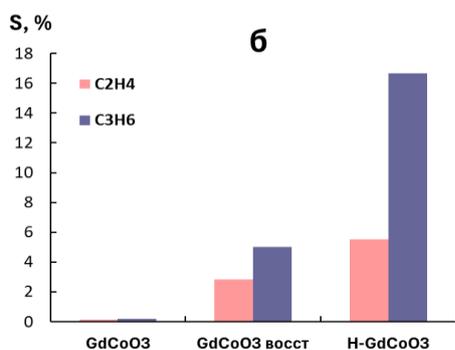


Рис. 4. Селективность по этилену и пропилену при гидрировании монооксида углерода на образце  $GdCoO_3$ , его восстановленной и протонированной формах ( $T = 723K$ )

Сравнение кажущихся энергий активации образования продуктов реакции показало, что в результате протонирования исходных образцов происходит заметное снижение энергетического барьера для всех продуктов:

-  $H-GdCoO_3$  - снижение энергии активации образования метана составило  $\Delta E_a(CH_4) = 30 - 23 = 7$  кДж/моль, этилена  $\Delta E_a = 13$  кДж/моль и пропилена  $\Delta E_a = 14$  кДж/моль. При этом в результате протонирования увеличивались и предэкспоненциальные множители, характеризующие число активных центров поверхности, т.е. рост селективности связан с активацией поверхности (рост  $\ln k_0$ ) и формировании центров, ответственных за образование олефинов.

Таким образом, протонирование оказывает ключевое влияние на формирование активных центров, ответственных за селективное образование  $C_2$ - $C_3$ -олефинов, в то время как восстановление, несмотря на изменение степени окисления переходных металлов, не приводит к значимому улучшению селективности. Это подчёркивает высокую эффективность протонирования как метода направленной модификации перовскитных катализаторов для процессов получения лёгких ненасыщенных углеводородов.

Изучение каталитической активности восстановленной формы образца  $GdCoO_3$  в реакции гидрирования монооксида углерода в атмосфере водорода показало, что восстановление не оказывает ожидаемого положительного влияния на повышение активности катализаторов.

#### Заключение

Проведённое исследование подтвердило, что кислотное протонирование является эффективным методом модификации перовскитного катализатора  $GdCoO_3$ , приводящим к направленному изменению его функциональных свойств без разрушения основной кристаллической структуры.

Показано, что замещение ионов  $K^+$  на  $H^+$  в структуре предшественника  $Gd_{0,95}K_{0,05}CoO_3$  вызывает значимые микроструктурные изменения (уменьшение размера кристаллитов, сжатие решётки) и модифицирует кислотно-основные характеристики поверхности катализатора.

Каталитические испытания в реакции гидрирования монооксида углерода продемонстрировали, что активность и селективность катализатора определяются комплексом факторов, ключевым из которых является наличие протонов в структуре. Наибольшую конверсию CO и селективность по лёгким олефинам  $C_2$ - $C_4$  продемонстрировал протонированный образец  $H-GdCoO_3$ . При этом протонирование привело к резкому снижению скорости образования нежелательного диоксида углерода по сравнению с исходным катализатором. В то же время восстановительная предобработка образца не оказала столь значимого положительного влияния на селективность процесса.

Таким образом, результаты работы подтверждают, что именно внедрение протонов и изменение степени окисления металлов, играет решающую роль в формировании активных центров, селективных к образованию этилена и пропилена. Это подчёркивает высокую эффективность кислотного протонирования как целевого метода для разработки высокоселективных катализаторов синтеза ценных низших олефинов из  $C_1$ -сырья.

#### Список литературы

1. Peña M. A., Fierro J. L. G. Chemical structures and performance of perovskite oxides // *Chemical reviews*. - 2001. - Т. 101. - No. 7. - С. 1981-2018.
2. Escalona N., Fuentealba S., Pecchi G. Fischer-Tropsch synthesis over  $LaFe_{1-x}Co_xO_3$  perovskites from a simulated biosyngas feed // *Applied Catalysis A: General*. - 2010. - V. 381. - P. 253-260
3. Hou Y., Wang X., Chen M., Gao X., Liu Y., Guo Q.  $Sr_{1-x}K_xFeO_3$  Perovskite Catalysts with Enhanced RWGS Reactivity for  $CO_2$  Hydrogenation to Light Olefins // *Atmosphere*. 2022. V. 13. P. 760.
4. Rodionov I. A., Zvereva I. A. Photocatalytic activity of layered perovskite-like oxides in practically significant chemical reactions // *Advances in Chemistry*. - 2016. - Т. 85. - No. 3. - С. 248-279.
5. Tani S., Komori Y., Hayashi S., Sugahara Y. Local environments and dynamics of hydrogen atoms in protonated forms of ion-exchangeable layered perovskites estimated by solid-state  $^1H$  NMR // *Journal of Solid State Chemistry*. - 2006. - Т. 179. - С. 3357-3364.
6. Cimino S. et al. Methane combustion and CO oxidation on  $LaAl_{1-x}Mn_xO_3$  perovskite-type oxide solid solutions // *Applied Catalysis B: Environmental*. - 2003. - Т. 43. - No. 4. - С. 397-406.
7. Sheshko T.F., Akhmina P.V., Skvortsova L.G., Borodina E.M., Kryuchkova T.A., Zvereva I.A., Cherednichenko A.G. // *Catalysts*. - 2025. - V. 15. - P. 67
8. Yafarova L. V. et al. New data on protonation and hydration of perovskite-type layered oxide  $KCa_2Nb_3O_{10}$  // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. - 2021. - Т. 143. - №. 1. - С. 87-93.

УДК 544.723.212

Гасов Д.Ю., Чередниченко А.Г.

### Исследование процесса каталитического получения биодизеля из сырья животного происхождения

Гасов Д.Ю., магистр 2-ого года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва; Чередниченко Александр Генрихович, доктор химических наук, заведующий кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*Проведено исследование синтеза биодизеля каталитической переэтерификацией свиного жира этанолом с использованием гидроксида натрия. Исходное масло животного происхождения было получено двумя методами: жидкостной экстракцией *n*-гексаном и термическим вытапливанием. Для гомогенного каталитического процесса установлены и оптимизированы ключевые параметры: молярное соотношение масло:этанол:NaOH = 1:6:0.01, температура 75 °С, время реакции 90 мин. Методом ГХ-МС определен качественный и количественный состав конечного продукта, представляющего собой смесь этиловых эфиров жирных кислот с преобладанием этилолеата (34.48–37.68 % мас.) и этилпальмитата (17.98–20.43 % мас.). Определенные физико-химические показатели (плотность, кинематическая вязкость, температура вспышки) синтезированных образцов соответствуют стандартным требованиям к биотопливам (ASTM). Результаты работы подтверждают техническую возможность и эффективность использования отходов животного происхождения для производства биодизеля на основе этанола.*

*Ключевые слова:* биодизель, переэтерификация, свиной жир, этанол, натрия гидроксид, каталитический синтез, жирные кислоты этиловые эфиры, ГХ-МС, физико-химические свойства, возобновляемое топливо, зелёная химия

### Study of the catalytic process of biodiesel production from raw materials of animal origin

Gasov D.Y., Cherednichenko A.G.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*A study was conducted on the synthesis of biodiesel via catalytic transesterification of pork fat with ethanol using sodium hydroxide. The initial animal-based oil was obtained by two methods: liquid extraction with *n*-hexane and thermal rendering. Key parameters for the homogeneous catalytic process were established and optimized: a molar ratio of oil:ethanol:NaOH = 1:6:0.01, temperature of 75 °C, and reaction time of 90 min. The qualitative and quantitative composition of the final product, which is a mixture of fatty acid ethyl esters dominated by ethyl oleate (34.48–37.68 wt.%) and ethyl palmitate (17.98–20.43 wt.%), was determined by GC-MS. The determined physicochemical parameters (density, kinematic viscosity, flash point) of the synthesized samples meet the standard requirements for biofuels (ASTM). The results of the work confirm the technical feasibility and efficiency of using animal waste for the production of ethanol-based biodiesel.*

*Keywords:* biodiesel, transesterification, pork fat, ethanol, sodium hydroxide, catalytic synthesis, fatty acid ethyl esters (FAEE), GC-MS, physicochemical properties, renewable fuel, green chemistry

### Введение

Возрастающие энергетические потребности общества сталкиваются с ограниченностью и неизбежным истощением запасов традиционных ресурсов. Данный факт актуализирует поиск альтернативных источников сырья и источников энергии в условиях развивающейся химической промышленности. Не менее значимым фактором является экологическая нагрузка от использования ископаемого топлива, связанная со значительными выбросами диоксида углерода, являющегося одним из основных парниковых газов, способствующих глобальным климатическим изменениям [1]. Совокупность этих факторов определяет необходимость развития технологий получения эффективных и возобновляемых видов топлива. В

последнее время в данной области производство и применение биотоплива рассматривается как одно из перспективных решений обозначенной проблемы.

Одним из ключевых видов возобновляемого топлива является биодизель. Его основные преимущества перед ископаемым аналогом заключаются в существенно более низких выбросах оксидов серы и углерода, а также в улучшенных смазывающих характеристиках и высоком цетановом числе, что делает его более эффективным топливом для эксплуатации [2,3]. По химическому составу биодизель представляет собой смесь моноалкильных эфиров жирных кислот, преимущественно метиловых или этиловых. Синтез осуществляется методом каталитической трансэтерификации триглицеридов, входящих в состав природных масел и жиров

растительного или животного происхождения, соответствующими низкомолекулярными спиртами.

Сырьем для получения биодизеля служат материалы с высоким содержанием жирных кислот, доступные для транспортировки и хранения. В зависимости от вида сырья, биодизель подразделяют на три поколения. Первое поколение использует пищевые культуры (рапс, соя, пальмовое масло). Их применение не является экономически оптимальным из-за конкуренции за пахотные земли с продовольственным сектором и высоких энергозатрат при выращивании. Второе поколение основано на непродовольственном сырье: не употребляемых в пищу растениях (ятрофа, жожоба), отработанных растительных маслах и животных жирах. Это позволяет решить проблему утилизации отходов и избежать конкуренции с пищевой промышленностью [4]. Третье поколение использует липиды микроводорослей, способных накапливать биомассу, в том числе в сточных водах. Главными преимуществами этого вида сырья являются высокая продуктивность и отсутствие потребности в пахотных землях. Однако препятствием для масштабирования выступают технологические сложности в культивировании, хранении и переработке биомассы микроводорослей [5].

Таким образом, сырьё второго поколения, в частности отходы животного происхождения, представляет собой компромиссный вариант, сочетающий доступность, низкую стоимость и решение экологических задач утилизации. Животные жиры (говяжий, свиной, куриный) являются крупнотоннажным отходом мясоперерабатывающей промышленности, что исключает конкуренцию с пищевым сектором. Однако их использование в каталитической трансэтерификации сопряжено с рядом технологических сложностей. Высокое содержание насыщенных жирных кислот приводит к повышенной температуре застывания получаемого биодизеля, а присутствие свободных жирных кислот требует либо предварительной стадии этерификации, либо применения специфических катализаторов, устойчивых к побочным реакциям омыления. В связи с этим, разработка и оптимизация каталитических систем для конверсии животных жиров остаются важной практической задачей, требующей детального изучения влияния параметров процесса и свойств катализатора на выход и качество конечного продукта [6].

### Экспериментальная часть

Выделение жира из исходного сырья проводили двумя методами. Первый метод представлял собой экстракцию по Сокслету. На аналитических весах отбирали навеску свиного сала, которую помещали в бумажный патрон экстрактора. В качестве экстрагента использовали 300 мл гексана, который помещали в предварительно взвешенную круглодонную колбу. Для минимизации тепловых потерь колбу с растворителем изолировали асбестовой тканью. Нагрев колбы до кипения с

одновременным магнитным перемешиванием инициировал процесс экстракции: пары гексана конденсировались и экстрагировали жир из образца в патроне. При заполнении сифона до верхнего уровня экстракт самотёком возвращался в кипящую колбу, после чего цикл повторялся. Данная методика обеспечивает многократную циркуляцию свежего растворителя через образец и концентрирование экстрагированного жира в колбе. Процесс экстракции продолжали в течение 4 часов. После охлаждения гексан удаляли из полученного раствора на роторном испарителе. Массу выделенного жира определяли взвешиванием колбы, после чего продукт хранили для последующих стадий синтеза.

С целью изучения физико-химических свойств получившихся образцов биодизеля были использованы стандартные методы испытаний, указанные в сборнике [7].

Определение плотности (D4052). В предварительно взвешенный пикнометр объёмом 5 мл наливали образец биодизеля до метки. После чего взвешивали пикнометр с биодизелем на аналитических весах, после чего по разности масс заполненного и пустого пикнометров находили массу биодизеля и делили её на заданный объём в результате получая плотность образца при комнатной температуре (25 °C).

Определение цвета биотоплива (D1500). Образец биодизеля помещали в стеклянную колбу и при ровном освещении сравнивали цвет жидкости с цветами эталонных карточек, после совпадения записывали значение цвета соответствующей карточки в качестве контрольного показателя образца биодизеля.

Определение зольности (D482). Образец биодизеля, взвешенный на аналитических весах, помещали в кварцевый тигель и полностью сжигали пока в качестве продуктов не оставались уголь и зола. Затем полученный углеродистый остаток нагревали в муфельной печи до 775-800 °C в течение 2 часов, после чего тигль с содержимым охлаждали и взвешивали полученный остаток на аналитических весах. Полученное значение делили на начальный вес образца и вычисляли процентное содержание в нем золы

Для определения химического состава образцы биодизеля были переданы на анализ методом ГХ/МС.

### Обсуждение результатов

Методика проведения реакции переэтерификации была адаптирована на основе успешного опыта получения биодизеля из масла *Jatropha curcas* L. с использованием этанола. В качестве сырья выступил жир, предварительно выделенный из свиного сала методами жидкостной экстракции *n*-гексаном и термического воздействия. Главные параметры процесса: молярное соотношение исходного сырья, этанола и катализатора 1:6:0,1, температура = *t* кипения этанола и время реакции = 90 минут. После синтеза и охлаждения продукты реакции разделяли двухэтапно: центрифугированием в течение 2 часов и

гравитационным отстаиванием в делительной воронке. Наблюдаемое при этом образование выраженного пограничного слоя, вероятно, является следствием применения более гидрофильного этанола вместо метанола. Целевой жидкий слой биодизеля отделяли от глицериновой фазы, промывали водой и готовили к последующему анализу.

Для установления качественного и количественного состава продуктов переэтерификации образцы биодизеля исследовали методом газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием (ГХ-МС). Интерпретация полученных хроматограмм (рис. 1, 2) показала, что все образцы представляют собой многокомпонентные смеси, о чем свидетельствует наличие серии четко разрешенных пиков.

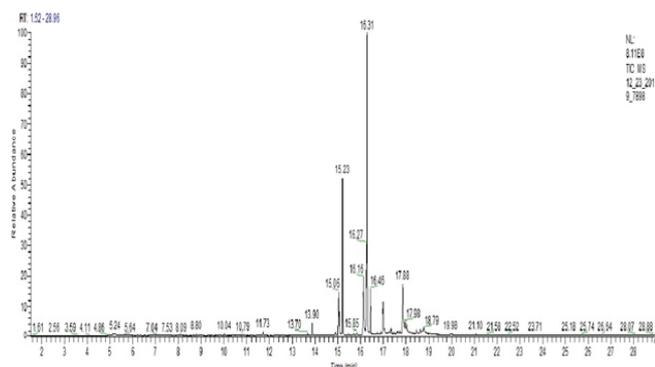


Рис. 1. Результаты хроматографического анализа биодизеля полученного из животного жира (экстракция) путём трансэтерификации этанолом.

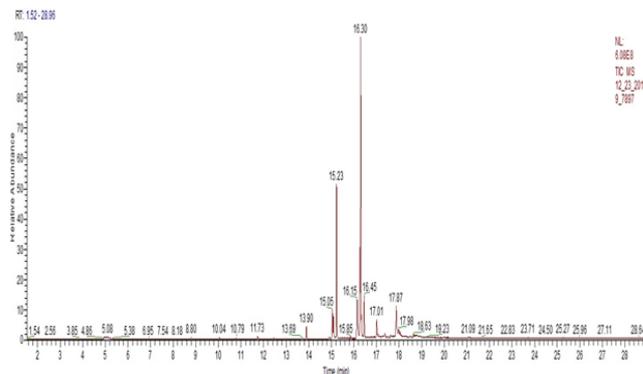


Рис. 2. Результаты хроматографического анализа биодизеля полученного из животного жира (термический метод) путём трансэтерификации этанолом.

Хроматографические профили обоих образцов демонстрируют значительное сходство в качественном составе, что проявляется в совпадении времен удерживания основных целевых пиков. В то же время наблюдаются небольшие количественные различия в соотношении площадей этих пиков, что может быть обусловлено различными способами выделения исходного жира.

Идентификация отдельных соединений по данным масс-спектров позволила подтвердить присутствие целевых сложных эфиров жирных кислот (этиловых эфиров), а также выявить сопутствующие вещества, такие как жирные кислоты и остаточные диалкилглицериды, что указывает на неполноту протекания реакции (таблицы 1, 2).

Таблица 1. Состав продуктов биодизеля из животного жира (экстракция) по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

№ п/п	Наименование компонента	Время удерживания, мин	Процентное содержание, мас. %
1	Этиловый эфир 9-оксононановой кислоты	11,73	0,47
2	Этиловые эфиры C14:0	13,90	1,25
3	Карбоновые кислоты C16:0	15,06	5,03
4	Этиловые эфиры C16:1	15,09	2,56
5	Этиловые эфиры C16:0	15,23	17,98
6	Карбоновые кислоты C18:1 и C18:2	16,16	10,22
7	Этиловые эфиры C18:2	16,27	7,53
8	Этиловые эфиры C18:1	16,31	34,48
9	Этиловые эфиры C18:0	16,46	4,68
10	Диацилглицериды	18,04	2,04

Результаты анализа показали, что состав биодизеля, синтезированного из свиного жира, практически не зависит от способа предварительного выделения масла (экстракция н-гексаном или термическим методом). Это подтверждается полным совпадением качественного состава идентификацией одних и тех же основных компонентов и их времен удерживания на хроматограммах. Количественные различия, однако, присутствуют и объясняются исходной вариацией жирнокислотного состава масел. Так, содержание этилового эфира пальмитиновой

кислоты (C16:0) составило 17,98 % мас. и 20,43 % мас., а этилового эфира олеиновой кислоты (C18:1) — 34,48 % мас. и 37,68 % мас. для образцов, полученных из масла после экстракции н-гексаном и термического вытапливания соответственно.

Таблица 2. Состав продуктов биодизеля из животного жира (термический метод) по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

№ п/п	Наименование компонента	Время удерживания, мин	Процентное содержание, мас. %
1	Этиловый эфир 9-оксононановой кислоты	11,73	0,47
2	Этиловые эфиры C14:0	13,90	1,25
3	Карбоновые кислоты C16:0	15,06	5,03
4	Этиловые эфиры C16:1	15,09	2,56
5	Этиловые эфиры C16:0	15,23	17,98
6	Карбоновые кислоты C18:1 и C18:2	16,16	10,22
7	Этиловые эфиры C18:2	16,27	7,53
8	Этиловые эфиры C18:1	16,31	34,48
9	Этиловые эфиры C18:0	16,46	4,68
10	Диацилглицериды	18,04	2,04

1	Этиловый эфир 9-оксононановой кислоты	11,73	0,60
2	Этиловые эфиры C14:0	13,90	1,54
3	Карбоновые кислоты C16:0	15,05	4,66
4	Этиловые эфиры C16:1	15,09	3,23
5	Этиловые эфиры C16:0	15,23	20,43
6	Карбоновые кислоты C18:1 и C18:2	16,15	8,03
7	Этиловые эфиры C18:2	16,27	9,59
8	Этиловые эфиры C18:1	16,30	37,68
9	Этиловые эфиры C18:0	16,45	5,10
10	Диацилглицериды	18,04	1,12

В соответствии с описанными методиками были определены ключевые физико-химические и эксплуатационные характеристики полученных образцов биодизеля (таблица 3).

Таблица 3. Физико-химические свойства биодизеля, полученного из животного сырья с использованием этанола.

Номер образца	Плотность г/мл	Цвет	Зольность, %
1 (масло получено экстракцией)	0,8754	1,5	0,030
2 (масло получено термическим методом)	0,8726	1,5	0,033
Эталон (ASTM)	0,86-0,90	1,5	0,010

Ключевым показателем для оценки качества биодизельного топлива является цетановое число. Однако для образцов, синтезированных из сырья животного происхождения, определение данного параметра оказалось невозможным ввиду технических ограничений используемой аналитической аппаратуры, а именно конструктивных особенностей и настроек измерительного датчика. В то же время, измерение цетанового числа для традиционного нефтяного дизельного топлива и биодизеля из растительного сырья не вызвало затруднений. Сравнительный анализ экспериментальных данных с требованиями стандартов к топливным характеристикам показал их соответствие установленным нормам.

#### Заключение

В ходе проведенного исследования была успешно реализована и оптимизирована методика

синтеза биодизеля из нетрадиционного сырья — свиного жира — с применением менее токсичного этанола. Установлено, что оптимальные условия каталитической переэтерификации (соотношение 1:6:0,01, 75 °C, 90 мин.) позволяют достичь высокого выхода целевого продукта независимо от метода получения исходного масла (н-гексановая экстракция или термическое вытапливание).

Результаты хромато-масс-спектрометрического анализа подтвердили образование сложной смеси этиловых эфиров, качественный профиль которой стабилен, а количественные вариации в содержании этилпальмитата (C16:0) и этилолеата (C18:1) коррелируют с исходным жирнокислотным составом сырья.

Определенные физико-химические свойства синтезированных образцов, за исключением цетанового числа, измерение которого потребует адаптации методики, соответствуют нормативным требованиям к биотопливам. Полученные результаты расширяют сырьевую базу для производства возобновляемого дизельного топлива и указывают на перспективность использования отходов мясной промышленности в энергетических целях.

#### Список литературы

- Algarni S., Tirth V., Alqahtani T., Alshehery S., Kshirsagar P. Contribution of renewable energy sources to the environmental impacts and economic benefits for sustainable development // Sustain. Energy Technol. Assessments – 2023. – V. 56. – A. 103098.
- Jalaludin H. A., Abdullah N. R., Sharudin H., Asiah A. R. and Jumali M. F. Emission Characteristics of Biodiesel Ratios of 10%, 20% and 30% in Single Cylinder Diesel Engine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering – 2020. – V. 834.
- Kamaraj R, Rao Y. K. S. S. and Balakrishna B. Biodiesel blends: a comprehensive systematic review on various constraints // Environ Sci Pollut – 2022. – V. 29. – P. 43770–43785.
- Alalwan H. A., Alminshid A. H., Aljaafari H. A. Promising evolution of biofuel generations // Subj. rev. Renewable Energy Focus – 2019. – V. 1(28). – P. 127–139.
- Singh D., Sharma D., Soni S., Sharma S., Sharma P.K., Jhalani A. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel // Fuel – 2020. – V. 262. – A. 116553
- Binhweel, F., Hossain, M.S. & Ahmad, M.I. Recent Trends, Potentials, and Challenges of Biodiesel Production from Discarded Animal Fats: a Comprehensive Review // Bioenerg. Res. – 2023. – V. 16. – P. 778–800.
- Rand S.J. Annual book of ASTM standards American Society for Testing and Materials. West Conshohocken. - 2005. – 212 p.

УДК 668.6

Покровский С.Я., Пигас А.В., Зверева О.В.

## Современное состояние и тенденции развития мирового и российского рынков полиуретанов

Пигас Александр Валерьевич – студент;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры ЛогЭКИ;

Покровский Савва Ярославович – студент.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

*В статье представлен структурированный анализ современного состояния мирового и российского рынков полиуретанов. На основе имеющихся статистических данных рассматриваются ключевые тенденции, динамика спроса, распределение потребления по отраслям и региональные особенности, влияющие на развитие рынка. Особое внимание уделено автомобильной, электронной, обувной, строительной и упаковочной промышленности как основным потребителям полиуретановых материалов. Анализ включает оценку позиции России на глобальном рынке, с учётом производства, импорта, экспорта и ограничений, связанных с сырьевой базой. Материал систематизирован в научно-аналитической форме с сохранением всех количественных показателей, что позволяет получить целостное представление о текущем состоянии рынка и тенденциях его развития.*

*Ключевые слова:* полиуретаны, мировой рынок, российский рынок, производство, потребление, импорт, экспорт, изоцианаты, МДИ, ТДИ, отраслевой анализ.

### Current state and development trends of the global and Russian polyurethane markets

Pokrovskii S.Y., Pigas A.V., Zvereva O.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article presents a structured analysis of the current state of the global and Russian polyurethane markets. Based on the available statistical data, key trends, demand dynamics, consumption distribution by industry, and regional specifics affecting market development are considered. Special attention is paid to the automotive, electronics, footwear, construction and packaging industries as the main consumers of polyurethane materials.*

*The analysis includes an assessment of Russia's position in the global market, taking into account production, imports, exports and restrictions related to the raw material base. The material is systematized in a scientific and analytical form while preserving all quantitative indicators, which allows us to get a holistic view of the current state of the market and its development trends.*

*Keywords:* polyurethanes, global market, Russian market, production, consumption, import, export, isocyanates, MDI, TDI, industry analysis.

### Введение

Полиуретаны занимают ключевое место в мировой химической промышленности благодаря своему широкому спектру эксплуатационных свойств, высокой универсальности и возможности применения в различных секторах производства. Эти полимерные материалы используются не только в традиционных областях, таких как автомобильная и строительная отрасли, но и в высокотехнологичных сегментах, включая электронику, обувное производство и упаковку. Универсальность полиуретанов определяется их физико-химическими характеристиками: высокой прочностью, стойкостью к воздействию внешних факторов, гибкостью и возможностью регулирования свойств материала под конкретные производственные задачи. Динамика развития мирового рынка полиуретанов во многом отражает общие тенденции экономического роста, технологического прогресса и трансформацию потребительских предпочтений, а также интеграцию новых материалов в глобальные процессы индустриализации. Помимо этого, значительное влияние на развитие отрасли оказывает доступность и стабильность производственной базы, включая

сырьевые компоненты, технологические установки, квалифицированный персонал и инновационные производственные процессы, что напрямую определяет способность национальных экономик наращивать выпуск полиуретановой продукции и удовлетворять внутренний и внешний спрос.

Целью настоящего исследования является комплексный и системный анализ современного состояния мирового рынка полиуретанов с одновременной оценкой текущей ситуации и динамических тенденций российского сектора отрасли на основании имеющихся данных. Анализ охватывает ключевые показатели производства и потребления, сегментацию отраслевого применения полиуретановых материалов, а также оценку региональных особенностей и различий в спросе и предложении. Особое внимание уделяется изучению взаимосвязи экономических, технологических и структурных факторов, влияющих на развитие отрасли в перспективе, а также возможностям оптимизации производственной и сбытовой цепочки. В работе рассматриваются ключевые тенденции глобального рынка, включая рост сегментов с повышенным экологическим и технологическим

содержанием, а также факторы, ограничивающие расширение производства в отдельных странах, с акцентом на роль России в мировой индустрии полиуретанов.

#### **Общие тенденции и масштабы рынка**

Мировой рынок полиуретанов в 2025 году оценивается в 87,68 млрд долларов США с прогнозируемым ростом до 113,84 млрд долларов США к 2030 году при среднегодовом темпе роста 5,36% [1]. Развитие полиуретановой промышленности определяется технологическими сдвигами и переходом к экологичным материалам. Рост мирового автомобильного производства, достигшего 85,01 млн единиц в 2022 году, подтверждает стабильный спрос на полиуретан в транспортной отрасли. Существенным фактором является активизация исследований, связанных с биотехнологическими решениями, что подтверждается заключённым в 2023 году соглашением BASF и Qore LLC о доступе к биологически получаемому 1,4-бутандиолу.

#### **Роль электронной промышленности**

Объём мирового производства электроники в 2022 году достиг уровня 3440 млрд долларов США, а полиуретаны продолжают занимать значимое место в производстве защитных и изоляционных материалов. Развитие гибкой электроники и носимых устройств усиливает требования к полиуретановым решениям. Инновации, такие как разработки Lubrizol Engineered Polymers, позволившие снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 50%, отражают экологический вектор отрасли.

#### **Полиуретаны в обувном производстве**

Мировое производство обуви в 2022 году достигло 23,9 млрд пар, что подтверждает значимость отрасли как потребителя полиуретанов [2]. Консолидация компаний, например приобретение Carpenter Co подразделения Recticel, усиливает вертикальную интеграцию производственных мощностей и ускоряет внедрение улучшенных полиуретановых материалов в обувной промышленности.

#### **Полиуретаны в упаковочной промышленности**

Упаковочный сектор переживает значительный сдвиг в пользу перерабатываемых и биоразлагаемых полиуретановых материалов. Растущий спрос связан с ужесточением экологических норм и потребностью в высокоэффективных защитных покрытиях, особенно в сфере пищевой и промышленной упаковки.

#### **Автомобильная промышленность и переход к электромобилям**

Переход на лёгкие конструкции и электротранспорт стимулирует использование полиуретанов, отличающихся малым весом и высокой прочностью. Полиуретановые клеи заменяют традиционные механические крепления, снижая массу автомобилей. Снижение массы на 10% обеспечивает экономию топлива на 6–8%, что критично для гибридных и электрических автомобилей. Ожидается, что автомобильный сегмент рынка полиуретанов будет расти со скоростью около 6% ежегодно в период 2024–2029 гг [3].

#### **Строительный сектор**

Мировое строительство демонстрирует устойчивый рост. В 2022 году стоимость частного строительства в США достигла 1 434,2 млрд долларов, увеличившись на 11,7% к предыдущему году [4]. Полиуретаны востребованы благодаря влагостойкости, прочности, герметизирующим свойствам и способности снижать энергопотребление зданий за счёт уменьшения теплопотерь.

#### **Региональные особенности**

Азиатско-Тихоокеанский регион является крупнейшим мировым рынком полиуретанов. Наибольшую долю занимает Китай — около 66% регионального рынка, что обусловлено мощным строительным, промышленным и автомобильным секторами. Индия демонстрирует темп роста около 6% и активно наращивает потребление полиуретановой продукции в рамках государственных программ развития.

Североамериканский рынок характеризуется высоким уровнем технологического развития. США удерживают около 74% регионального рынка, а Канада демонстрирует наиболее высокий темп роста — около 5% в период 2024–2029 гг [1].

Европейский рынок формируется под влиянием экологических требований и высоких стандартов производства. Германия занимает лидирующую позицию благодаря развитой промышленной базе.

Рост южноамериканского и ближневосточного рынков связан с расширением строительства и индустриализации. Наиболее активно развиваются Бразилия и Саудовская Аравия.

#### **Основные мировые производители**

На глобальном рынке доминируют Huntsman International LLC, Wanhua, BASF SE, Covestro AG и Dow. Компании сосредоточены на разработке биоосновных полиуретанов, расширении производственных мощностей и углублении взаимодействия с конечными потребителями.

#### **Российский рынок полиуретанов**

Несмотря на рост российского производства полиуретанов, потребность внутреннего рынка полностью не удовлетворяется, что поддерживает высокий уровень импорта. На российском рынке действует ряд крупных производителей полиуретановых изделий, среди которых «Европласт», «Уретан Тех», «Уником-сервис», «Нерезина», «Симург», «ТехМашПолимер», «Завод Полимерных Изделий», «Уральский завод полимерных материалов», «СУРЭЛ», СОМЭКС, «Блокформ» и «Эластопласт». Производители сырья включают «СИБУР», «Эластокам», «Химтраст», «Синтез Ока», «Полихим Системс» и «Макромер».

Импорт и экспорт полиуретановой продукции Ожидается, что к 2026 году Россия увеличит экспорт полиуретана до 12,345 млн кг, продолжая среднегодовой темп роста 13,2% с 2001 года [5]. При этом страна также относится к крупнейшим мировым импортёрам полиуретана: прогноз на 2026 год составляет 61,8 млн кг. Рост спроса с 2001 года оценивается на уровне 5,9% ежегодно.

#### Ограничения сырьевой базы

Ключевая проблема российского рынка — дефицит изоцианатов, прежде всего МДИ и ТДИ. Совокупная нехватка сырья в 2020 году составила 197 тыс. тонн. Основными международными поставщиками являются BASF, Covestro, Huntsman, Dow и Wanhua Chemical. Согласно данным, потребление изоцианатов в России в 2023 году достигло 250 тыс. тонн при среднем темпе прироста 7,4% в период 2018–2023 гг. На долю МДИ приходится 75,4% всего импорта изоцианатов [6].

#### Прогнозы потребления

Потребление МДИ в строительной отрасли России оценивается в 205 тыс. тонн в 2024 году, что на 5% выше показателя 2023 года. К 2028 году прогнозируется рост до 245 тыс. тонн. Общий спрос на МДИ к 2025 году оценивается на уровне 213 тыс. тонн.

#### Выводы

Проведённый анализ показывает, что мировой рынок полиуретанов характеризуется устойчивым ростом, обусловленным расширением применения материалов в автомобильной, электронной, обувной, строительной и упаковочной промышленности. Географическая структура рынка подтверждает ведущую роль Азиатско-Тихоокеанского региона при активном развитии Северной Америки и Европы.

Российский рынок демонстрирует значительный потенциал, однако сталкивается с системными ограничениями, связанными с дефицитом сырьевой базы, прежде всего изоцианатов [5]. Несмотря на рост производства, страна сохраняет высокую зависимость от импорта полиуретанового сырья. Вместе с тем устойчивый рост потребления в основных секторах экономики, расширение производства и наращивание экспорта свидетельствуют о перспективности дальнейшего развития отрасли.

#### Список литературы

1. Polyurethane Market Size, Share & Industry Analysis, By Product Type (Rigid Foam, Flexible Foam, Molded Foam, Elastomers, Adhesives & Sealants, Coatings, and Others), By Application (Furniture, Construction, Electronics, Automotive, Packaging, Footwear, and Others), and Regional Forecast, 2024-2032 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/polyurethane-pu-market-101801> (дата обращения 08.04.2025).
2. The World Footwear Yearbook 2023. – Porto : World Footwear, 2023. – 290 p. – ISBN 978-1032148434.
3. Илларионов В. А. Полимеры в автомобилестроении / В. А. Илларионов, О. Ю. Малозёмов // Теория и практика современной науки. - №12 (78). - 2021. - С. 143-149.
4. Н.М.С.С. Somarathna The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review / Н.М.С.С. Somarathna, S.N. Raman, D. Mohotti, A.A. Mutalib, K.H. Badri // Construction and Building Materials. – vol. 190. - 2018. – P. 995-1014.
5. Forecast: Export of Polyurethanes from Russia [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.reportlinker.com/dataset/615b154bbb76d0b156732866779520bc6cc3ace3> (дата обращения 08.04.2025).
6. Достаточно критично? Российская промышленность просит государство поддержать создание отечественного производства изоцианатов [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://neftgaz.ru/news/neftechim/851265-dostatochno-kritichno-rossiyskaya-promyshlennost-prosit-gosudarstvo-podderzhat-otchestvennogo-sozda/> (дата обращения 08.04.2025).

УДК 667.61

Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я.

**Методы подготовки металлических и неметаллических поверхностей для повышения адгезии лакокрасочных покрытий**

Пигас Александр Валерьевич – студент;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры ЛогЭКИ;

Покровский Савва Ярославович – студент.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе рассматривается комплекс технологических процессов, применяемых для подготовки металлических поверхностей перед нанесением лакокрасочных покрытий. На основе анализа нормативных требований и технологических регламентов описаны ключевые этапы предварительной обработки, включая травление, обезжиривание, фосфатирование, пассивирование, промывку и сушку. Особое внимание уделено влиянию этих процессов на адгезию, коррозионную стойкость и долговечность защитных покрытий. Приведены требования к состоянию поверхности, условиям хранения изделий после обработки и регламентируемые параметры технологических операций. Исследование направлено на обобщение современных методов и формирование систематизированного представления о подготовке поверхности в соответствии с требованиями ГОСТ и отраслевых нормативных документов.

Ключевые слова: подготовка поверхности, лакокрасочные покрытия, адгезия, травление, обезжиривание, фосфатирование, коррозионная стойкость.

**Methods of preparation of metallic and non-metallic surfaces to enhance the adhesion of paint coatings**

Pigas A.V. Zvereva O.V., Pokrovskiy S.Y.

D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

The paper considers a complex of technological processes used to prepare metal surfaces before applying paint coatings. Based on the analysis of regulatory requirements and technological regulations, the key stages of pretreatment are described, including etching, degreasing, phosphating, passivation, washing and drying. Special attention is paid to the effect of these processes on the adhesion, corrosion resistance and durability of protective coatings. The requirements for the surface condition, storage conditions of products after processing and regulated parameters of technological operations are given. The research is aimed at generalizing modern methods and forming a systematic understanding of surface preparation in accordance with the requirements of GOST and industry regulations.

Keywords: surface preparation, paint coatings, adhesion, etching, degreasing, phosphating, corrosion resistance.

**Введение**

Экономическая польза от лакокрасочных материалов (ЛКМ) становится очевидной, если посмотреть на их применение. Подавляющее большинство покрытий на основе ЛКМ, кроме придания декоративного вида, имеет целью защитные функции, а значит, и сохранение изделий и культурного наследия от разрушающего действия коррозии. На рисунке один наглядно продемонстрировано, как время влияет на изменения в ЛКМ.

Подготовка поверхности является одной из ключевых операций, определяющих качество и долговечность лакокрасочных покрытий, используемых в различных отраслях промышленности. Современные методы окрашивания требуют высокой степени чистоты поверхности, стабильности её структуры и отсутствия дефектов, способных снизить адгезионные свойства покрытия и ускорить процессы коррозии.

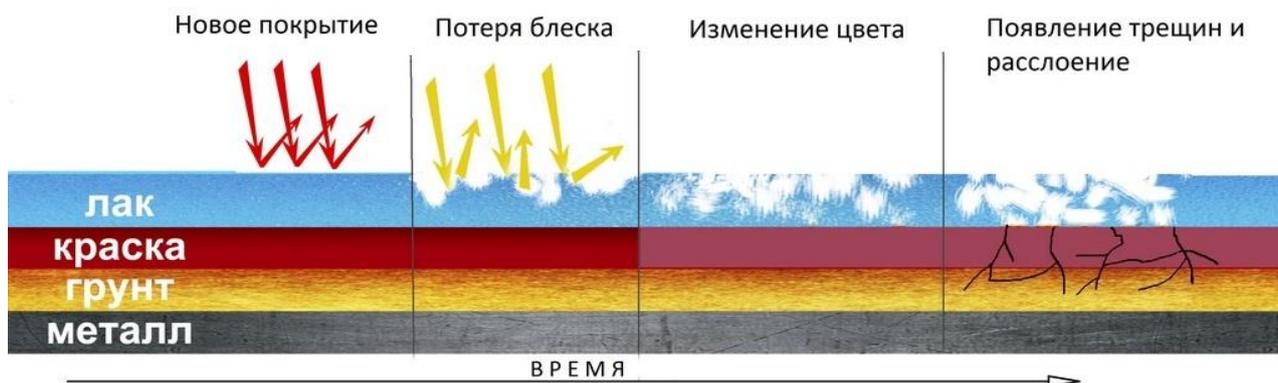


Рисунок – Основные виды разрушений ЛКМ

Нормативная документация устанавливает строгие требования к состоянию металлических поверхностей, условиям технологической обработки и режимам хранения изделий. Эти требования обеспечивают единообразие технологического процесса и высокое качество конечного изделия.

Цель исследования заключается в систематизации современных методов подготовки поверхности и научно-аналитическом описании технологических процессов травления, обезжиривания, фосфатирования, пассивирования, промывки и сушки в соответствии с действующими стандартами [1].

#### **Общие требования к подготовке поверхности**

Подготовка поверхности осуществляется преимущественно в специализированных технологических ваннах, однако в отдельных случаях допускается применение струйных методов. Независимо от выбранного способа критически важно исключить воздействие воды, коррозионно-активных жидкостей и их паров на уже подготовленную поверхность, что регламентируется требованиями нормативных документов.

После выполнения подготовительных операций изделия подлежат немедленному окрашиванию. В случаях вынужденной задержки хранения допускается только при условиях, исключающих вероятность загрязнения и развития коррозионных процессов. Срок хранения определяется видом поверхностного слоя: без неорганических покрытий он составляет не более 16 часов, тогда как при наличии фосфатных или хроматных плёнок допускается увеличение срока до 72 часов при условии применения жидких лакокрасочных материалов; при использовании электроосаждаемых и порошковых систем время хранения вновь ограничивается 16 часами.

Поверхности, предназначенные для окрашивания, должны быть свободны от заусенцев, острых кромок с радиусом менее 2 мм, сварочных брызг, наплывов пайки, прижогов и остатков флюса. На литых деталях недопустимо наличие макровключений, раковин, трещин, спаев и других нарушений сплошности металла. Допустимые отклонения могут быть указаны только в нормативной документации на конкретное изделие. Оценка степени окисления цветных металлов выполняется по методикам ГОСТ 27597 [2].

Горячеоцинкованный прокат, предназначенный под окрашивание, должен соответствовать нормам документации, предполагающей промасливание поверхности при отсутствии пассивации и узора кристаллизации.

#### **Процесс травления**

Травление представляет собой химическое удаление продуктов коррозии и оксидных пленок посредством обработки поверхности растворами минеральных кислот. Для выполнения процесса применяются низкоконцентрированные растворы серной, соляной, фосфорной и других кислот.

Обработка выполняется методом окунания либо распыления, при этом продолжительность ограничивается шестидесятиминутным интервалом.

Ключевым условием является предварительное обезжиривание поверхности, поскольку наличие жировых и масляных плёнок препятствует равномерному взаимодействию металлической основы с раствором кислоты. Для поддержания стабильности технологического процесса корректирование травильных растворов выполняется путём добавления концентрированных кислот [3], что обеспечивает постоянство химического состава и качество обработки.

#### **Обезжиривание**

Обезжиривание в водных щелочных растворах является одной из наиболее распространённых операций подготовки поверхности перед окраской. Составы для обезжиривания выбираются с учётом степени загрязнённости поверхности, материала изделия, геометрической сложности и характера производства.

Для эффективного процесса обезжиривания требуется обеспечение качественного смачивания поверхности, омыливание жиров, эмульгирование и последующее удаление загрязнений. В случаях, когда выбранный раствор не обеспечивает требуемого уровня чистоты, допускается применение альтернативных химических составов.

Традиционно применяемые хлорированные и хлорфторированные углеводороды постепенно вытесняются водными щелочными растворами, использование которых позволяет увеличить пожарную безопасность технологических процессов и сохранить высокие эксплуатационные показатели лакокрасочных покрытий [2]. Применение уайт-спирита допустимо лишь в исключительных ситуациях, что также отражено в действующих регламентах.

#### **Фосфатирование**

Фосфатирование представляет собой химическое образование на поверхности изделий нерастворимых фосфатных плёнок, которые выполняют функцию промежуточного защитного слоя. Данный процесс существенно повышает адгезию последующего лакокрасочного покрытия и снижает вероятность развития подплёночной коррозии.

Для повышения качества покрытия используется предварительная активация поверхности титансодержащими составами. Такая обработка способствует уплотнению структуры покрытия, уменьшению размеров кристаллов и улучшению эксплуатационных свойств окрашенных изделий.

В качестве основных реагентов применяют соли цинка и железа, а в отдельных случаях допускается использование солей марганца [2,4], что соответствует установленным нормативным требованиям.

#### **Пассивирование, промывка и сушка**

Пассивирование выполняется для повышения коррозионной стойкости окрашиваемых изделий и проводится методами окунания или распыления. Этот этап обеспечивает дополнительную химическую стабилизацию поверхности после фосфатирования.

Промывка является обязательной операцией, следующей после травления, обезжиривания и фосфатирования. Она осуществляется водой с температурой от 8 до 90 °С и обеспечивает удаление остатков химических реагентов. Заключительная промывка выполняется диминерализованной водой либо водой, соответствующей требованиям ГОСТ 2874–73, что предотвращает образование минеральных отложений.

Сушка проводится в сушильных камерах при температуре 60–150 °С или методом обдува сжатым воздухом по ГОСТ 9.010–73. Продолжительность операции составляет от 5 до 20 минут и определяется типом изделия и характеристиками технологического процесса [1,5].

#### Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что подготовка поверхности является многоэтапным процессом, обеспечивающим необходимые условия для формирования прочного и коррозионностойкого лакокрасочного покрытия. Каждая операция — от травления до сушки — выполняет строго определённую функцию, регламентированную нормативными документами и обеспечивающую высокое качество конечного изделия.

Соблюдение установленных технологических режимов, учет особенностей материалов и применение эффективных химических составов позволяют значительно повысить эксплуатационные характеристики лакокрасочных покрытий. Системный подход к подготовке поверхности обеспечивает стабильность технологических процессов и соответствует требованиям современного промышленного производства [6-8].

#### Список использованных источников

1. Брок Г., Гротеклаус П., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Машляковского. М.: Пэйнт-Медиа, 2004. 548 с.
2. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур: Пер. с нем. / Под ред. А. Д. Яковлева. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. 237 с.
3. Гущина Н.В., Яковлев А.Д., Гаринова Г.Н. Водно-суспензионные составы на основе твёрдых эпоксидных смол // Лакокрасочные материалы и их применение, 1999. - № 9.-С.11-12
4. Яковлев А.Д. Актуальные вопросы технологии порошковых лакокрасочных материалов и покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение, 2002. – 306 с.
5. Яковлев А.Д. Порошковые краски. - Л: Химия, 1987. – 216 с.
6. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В. Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 183-192. – DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.
7. Бизнес-моделирование реинжиниринга химико-технологических систем / Б. Б. Богомолов, Ю. М. Аверина, А. И. Верхососова, М. Е. Дюженко // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 2. – С. 20-25.
8. Системный анализ оценки степени экологической полноценности лакокрасочного материала при организации замкнутых систем водообеспечения производств / Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, А. И. Верхососова, Н. В. Гусева // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 1(280). – С. 121-122

УДК 544.723.212

Семенова С.В., Лазаренко А.С., Межекей А.М., Шешко Т.Ф., Крючкова Т.А., Чередниченко А.Г.

**Влияние калий-индуцированных кислородных вакансий на каталитическую активность  $GdFeO_3$  в гидрировании  $CO/CO_2$** 

Семенова С.В., бакалавр 4-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
 Лазаренко А.С., магистр 1-ого года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
 Межекей А.М., бакалавр 3-ого года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
 Крючкова Татьяна Алексеевна, к.х.н., старший научный сотрудник кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Шешко Татьяна Фёдоровна, к.х.н., доцент кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;  
 Чередниченко Александр Генрихович, доктор химических наук, заведующий кафедрой Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В данной работе проведено комплексное исследование физико-химических и каталитических свойств перовскитоподобного феррита гадолиния, модифицированного калием ( $Gd_{0.95}K_{0.05}FeO_{3-\delta}$ , шифр 5KGF). Образец был синтезирован цитрат-нитратным золь-гель методом. Методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии подтверждена фазовая чистота материала, кристаллизующегося в орторомбической сингонии, и наличие развитой пористой морфологии с размером агрегатов 50–60 нм. Установлено, что введение 5% калия приводит к существенному росту анионной дефектности структуры, что способствует формированию активных центров адсорбции оксидов углерода. В реакциях гидрирования  $CO$  образец продемонстрировал высокую стабильность и конверсию на уровне 78% при 723 К, значительно превосходя недотированные аналоги. В реакции гидрирования  $CO_2$  катализатор показал сбалансированную активность, обусловленную влиянием щелочного промотора на прочность связи поверхностных карбонатов.*

*Ключевые слова:* перовскит, феррит гадолиния, замещение калием, гидрирование диоксида углерода, кислородные вакансии, синтез Фишера-Тропша, низшие олефины

**INFLUENCE OF POTASSIUM-INDUCED OXYGEN VACANCIES ON THE CATALYTIC ACTIVITY OF  $GDFEO_3$  IN  $CO/CO_2$  HYDROGENATION**

Semenova S.V., Lazarenko A.S., Mezhekey A.M., Sheshko T.F., Kryuchkova T.A., Cherednichenko A.G.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*This study presents a comprehensive investigation of the physicochemical and catalytic properties of potassium-modified gadolinium ferrite ( $Gd_{0.95}K_{0.05}FeO_{3-\delta}$ , labeled as 5KGF). The sample was synthesized via a citrate-nitrate sol-gel method. X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) confirmed the phase purity of the material, which crystallizes in an orthorhombic system, as well as the presence of a well-developed porous morphology with aggregate sizes of 50–60 nm. It was established that the introduction of 5% potassium leads to a significant increase in the anionic structural deficiency, which promotes the formation of active sites for the adsorption of carbon oxides. In  $CO$  hydrogenation reactions, the sample demonstrated high stability and a conversion rate of 78% at 723 K, significantly outperforming its undoped counterparts. In the  $CO_2$  hydrogenation reaction, the catalyst exhibited balanced activity, attributed to the influence of the alkali promoter on the bonding strength of surface carbonates.*

*Keywords:* Perovskite, gadolinium ferrite, potassium promotion, carbon dioxide hydrogenation, oxygen vacancies, fischer-tropsch synthesis, light olefins.

**Введение**

Проблема глобального потепления, вызванная ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, в сочетании с постепенным истощением ископаемых топливных ресурсов, ставит перед мировой наукой задачу разработки инновационных технологий переработки углеродсодержащих газов в ценные продукты органического синтеза и компоненты моторных топлив [1]. Поэтому особое внимание уделяется процессам гидрирования монооксида и диоксида углерода. Монооксид углерода является традиционным сырьем для синтеза Фишера-Тропша, позволяющим получать широкий спектр углеводородов, в то время как диоксид углерода рассматривается как возобновляемый, но термодинамически стабильный источник углерода,

требующий разработки высокоэффективных каталитических систем для его активации [2].

Сложные оксиды со структурой перовскита общего состава  $ABO_3$  представляют собой один из наиболее перспективных классов каталитических материалов для решения задач экологической нейтрализации выбросов и получения синтетического сырья. Исключительная востребованность перовскитов обусловлена их высокой термической и химической стабильностью, а также уникальной способностью кристаллической решетки сохранять структурную целостность при частичном или полном замещении катионов в позициях А и В. Это свойство открывает широкие возможности для целенаправленного управления кислотно-основными характеристиками поверхности, изменения окислительно-

восстановительного потенциала активных центров и создания управляемой дефектности структуры [3,4]. Ферриты редкоземельных элементов, в частности феррит гадолиния, характеризуются высокой устойчивостью к зауглероживанию поверхности, однако их собственная активность в реакциях гидрирования оксидов углерода часто лимитирована низкой плотностью активных центров адсорбции [3].

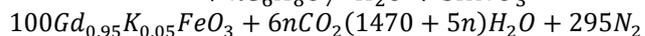
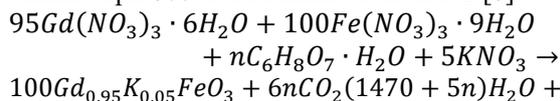
Одним из наиболее эффективных инструментов повышения реакционной способности ферритных перовскитов является их модификация щелочными металлами. Введение калия в кристаллическую структуру перовскита преследует решение двух фундаментальных задач. Во-первых, калий выступает в роли сильного электронного промотора, который, благодаря своей низкой электроотрицательности, увеличивает электронную плотность на атомах переходного металла в В-позиции. Это способствует ослаблению связи С–О в адсорбированных молекулах оксидов углерода и облегчает диссоциативную активацию водорода, что является ключевой стадией в формировании первичных углеводородных радикалов [5]. Во-вторых, калий значительно повышает общую основность поверхности катализатора.

Повышенная основность благоприятствует адсорбции кислых молекул  $\text{CO}_2$ , что позволяет интенсифицировать стадию реакции обратного сдвига водяного газа, превращая диоксид углерода в реакционноспособный монооксид углерода непосредственно на поверхности катализатора [4]. Кристаллохимический аспект замещения калием заключается в реализации неэквивалентного замещения, когда трехзарядный ион гадолиния замещается на однозарядный ион калия. Подобное замещение неизбежно ведет к возникновению дефицита положительного заряда в кристаллической решетке. Согласно принципу электронейтральности, компенсация этого дисбаланса происходит за счет двух механизмов: частичного окисления ионов железа или, что более важно для катализа, за счет удаления анионов кислорода из узлов решетки с образованием кислородных вакансий [3]. Именно эти вакансии выступают в роли специфических центров адсорбции, где происходит преимущественное связывание и активация молекул реагентов. Исследование образца  $\text{Gd}_{0,95}\text{K}_{0,05}\text{FeO}_{3-\delta}$  (5KGF) в данной работе направлено на выявление фундаментальных закономерностей влияния 5%-ного замещения калием на формирование аномально высокой концентрации вакансий и их роль в достижении высокой конверсии и селективности в отношении легких олефинов [5].

#### Экспериментальная часть

Образец 5KGF был получен методом цитрат-нитратного синтеза [4]. В качестве прекурсоров использовали гексагидрат нитрата гадолиния, нонагидрат нитрата железа и нитрат калия, подвергнутые хелатированию лимонной кислотой в водной среде. После стабилизации pH на уровне 6,5–6,7 раствором аммиака систему подвергали контролируемому упариванию и последующему термолузу органической матрицы при  $180^\circ\text{C}$ .

Финальная стабилизация дефектной перовскитной фазы осуществлялась путем высокотемпературного обжига при  $800^\circ\text{C}$  в течение семи часов [6].



Кристаллическая структура и фазовая чистота изучались методом порошковой рентгеновской дифракции (РФА) на дифрактометре Bruker Advance D8 с медным излучением. Параметры решетки рассчитывались на основе положений дифракционных максимумов в интервале углов  $2\theta$   $20\text{--}80^\circ$ , а средний размер кристаллитов. Элементный состав приповерхностного слоя и состояния атомов определялись методами энергодисперсионного микроанализа и рентгенофлуоресцентной спектроскопии

Для количественного измерения концентрации вакансий кислорода применялся метод йодометрического титрования в инертной атмосфере [4]. Навеску образца (30 мг) растворяли в соляной кислоте в присутствии избытка йодида калия. Количество выделившегося молекулярного йода, эквивалентное содержанию катионов металлов в высших степенях окисления, определяли титрованием  $0,02$  моль/л раствором тиосульфата натрия с крахмальным индикатором [2,3]. Параметр нестехиометрии  $\delta$  рассчитывали на основе уравнения масс-баланса элементов.

Для количественного измерения концентрации вакансий кислорода применялся метод йодометрического титрования в инертной атмосфере [2]. Навеску образца (30 мг) растворяли в соляной кислоте в присутствии избытка йодида калия. Количество выделившегося молекулярного йода, эквивалентное содержанию катионов металлов в высших степенях окисления, определяли титрованием  $0,02$  моль/л раствором тиосульфата натрия с крахмальным индикатором [7]. Параметр нестехиометрии  $\delta$  рассчитывали на основе уравнения масс-баланса элементов.

Исследование активности проводилось на автоматизированной установке проточного типа с U-образным кварцевым реактором [3]. Навеску катализатора (100 мг) разбавляли кварцевым песком и предварительно активировали при  $130^\circ\text{C}$ . Испытания проводились при атмосферном давлении в диапазоне  $298\text{--}723$  К при соотношении реагентов  $\text{CO}(\text{CO}_2):\text{H}_2=1:2$ . Анализ газовой смеси на выходе из реактора осуществлялся хроматографически (Кристалл 5000.1) с использованием детекторов по теплопроводности и пламенно-ионизационного детектора [3].

#### Обсуждение результатов

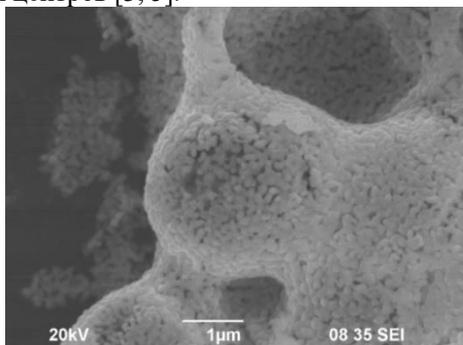
Для изучения физического фазового состава катализаторов был проведен рентгенофазовый анализ. Кристаллические фазы были идентифицированы с использованием базы PDF2. Данные РФА подтвердили однофазность образца 5KGF и его кристаллизацию в орторомбической сингонии (Pbma). Параметры кристаллической решетки и размеры кристаллитов в

образцах  $GdCo_xFe_{1-x}O_3$  приведены в таблице 1. Параметры ячейки модифицированного образца оказались несколько ниже, чем у немодифицированного образца вследствие некоторого искажения кристаллической решетки при внедрения крупного катиона калия [4].

Таблица 1. Результаты РФА анализа

	Параметры решетки, Å	V, Å <sup>3</sup>	Размер кристалло-в, нм	Пространственная группа
5KGF	a=4,93 b=5,41 c=7,31	195	27	Pbma
GF	a = 5,33 b = 5,58 c = 7,66	227	29	Pbma

Средний размер областей когерентного рассеяния составил 27 нм. СЭМ-анализ выявил губчатую морфологию, состоящую из сферических агрегатов (50–60 нм) с развитой системой мезопор, обеспечивающей высокую транспортную доступность активных центров [3, 5].

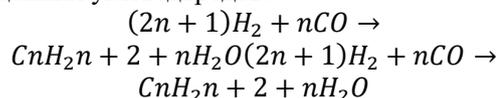
Рис. 1. Микрофотография сложного оксида  $Gd_{0,95}K_{0,05}FeO_3$ .

Энерго-дисперсионный анализ подтвердил наличие калия (0,25 масс. %), влияние которого на структуру остается определяющим, несмотря на частичную летучесть при синтезе [4].

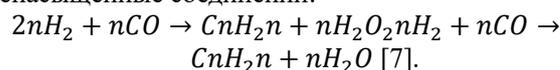
Согласно данным по йодометрическому титрованию, величина  $\delta$  для 5KGF составила  $0,509 \pm 0,008$  [4,5]. Это экстремально высокое значение указывает на то, что замещение 5% Gd на K генерирует максимальную плотность кислородных вакансий, которые становятся центрами адсорбции для  $CO_2$  [3,2]. Расчетные данные показали снижение эффективной степени окисления железа до 2,082 [4], что способствует диссоциативной активации водорода и повышает реакционную способность поверхности катализатора в восстановительных средах [3].

В процессе исследования реакции гидрирования монооксида углерода на катализаторе  $Gd_{0,95}K_{0,05}FeO_{3-\delta}$  подача реагентов осуществлялась в строго стехиометрическом соотношении  $CO:H_2=1:2$ . На поверхности модифицированного перовскита процесс инициируется адсорбцией молекулы монооксида углерода углеродным атомом на вакансию кислорода, концентрация которых в данной системе аномально высока. Электронное промотирование калием создает избыточный отрицательный заряд на атомах железа в позиции В, что усиливает эффект обратной донации

электронной плотности на разрыхляющие  $\pi$ -орбитали молекулы CO. Данное взаимодействие приводит к радикальному ослаблению связи C–O и ее последующему гетеролитическому разрыву. Образовавшийся в результате диссоциации активный поверхностный углерод подвергается последовательному гидрированию атомарным водородом, активация которого протекает на парах центров Fe–O. Основные маршруты формирования продуктов описываются уравнениями образования насыщенных углеводородов:



и ненасыщенные соединений:



При достижении температуры 723 К конверсия монооксида углерода на образце 5KGF составила 68%, что наглядно демонстрирует его преимущество перед базовым ферритом GF ( $GdFeO_3$ ), активность которого в аналогичных условиях падает до 55% вследствие интенсивной блокировки поверхности продуктами глубокого зауглероживания.

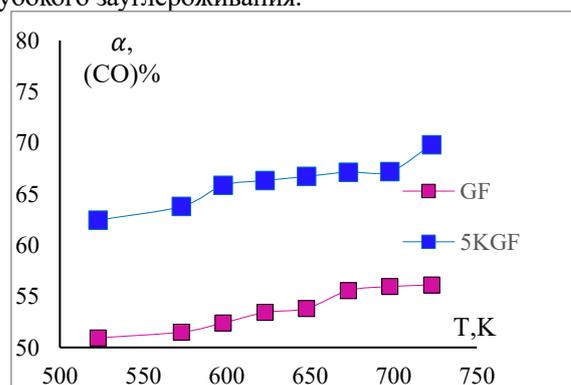
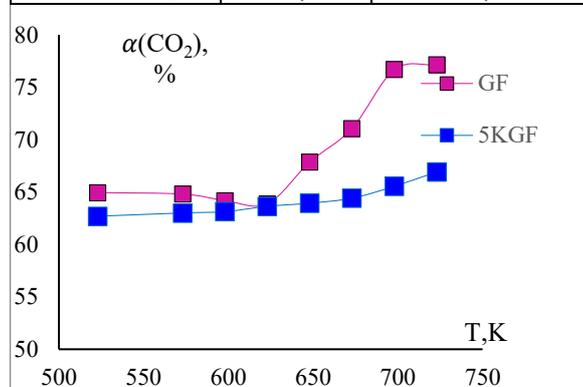


Рис. 2. Температурная зависимость конверсии CO в реакциях гидрирования на катализаторах GF и 5KGF. Превосходство калий содержащей системы обусловлено прежде всего десятикратным ростом анионной дефектности структуры: внедрение щелочного металла увеличило значение нестехиометрии от  $\delta=0,051$  для GF до  $\delta=0,509$  для 5KGF, что привело к формированию высокой плотности активных центров и, как следствие, к улучшению каталитической активности. Роль калия в данном процессе заключается не только в первичной активации реагента, но и в прецизионном управлении селективностью. Щелочной промотор способствует селективному образованию низших олефинов ( $C_2-C_3$ ). Кроме того, калий специфически ослабляет энергию связи непредельных углеводородов с активными центрами железа, стимулируя десорбцию этилена и пропилена до момента их полного насыщения водородом. Скорость образования этилена при 723 К на образце 5KGF достигла  $2,0 \times 10^{-22}$  ммоль/(г·ч), что подтверждает исключительную эффективность дефектной структуры перовскита в синтезе легких олефинов, практически не образующихся на чистом феррите GF [6,7].

Таблица 2. Скорость расходования CO при 723K при разных составах реакционной смеси.

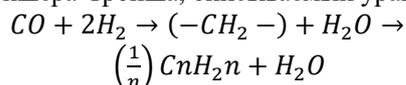
Количество CO <sub>2</sub> в смеси с CO	GdFeO <sub>3</sub>	Gd <sub>0,95</sub> K <sub>0,05</sub> FeO <sub>3-δ</sub>
	R <sub>CO</sub> , мкмоль/(г·ч)	
0 % CO <sub>2</sub>	104,2	56,6
33 % CO <sub>2</sub>	41,7	29,4
50 % CO <sub>2</sub>	25,5	31,9
100 % CO <sub>2</sub>	21,5	22,5

Рис. 3. Температурная зависимость конверсии CO<sub>2</sub> в реакциях гидрирования на катализаторах GF и 5KGF.

В реакциях превращения диоксида углерода CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>=1:2 образец 5KGF также демонстрирует качественно иные результаты по сравнению с GF. Процесс протекает по последовательному механизму, инициируемому обратной реакцией сдвига водяного газа (RWGS):



Аномально высокая концентрация вакансий кислорода в 5KGF выступает определяющим фактором радикального ускорения этой термодинамически затрудненной стадии. Образовавшийся на поверхности монооксид углерода немедленно вовлекается в цикл синтеза Фишера-Тропша, описываемый уравнением:



Несмотря на то, что общая конверсия CO<sub>2</sub> на 5KGF (60%) формально ниже, чем на GF (79%), модифицированная система обладает значительно более высокой термической стабильностью и устойчивостью к дезактивации [7].

Наиболее значимое преимущество 5KGF проявляется в условиях совместного гидрирования оксидов углерода при подаче смесей типа CO:CO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>=1:1:2.

В данных условиях образец 5KGF проявляет уникальный стабилизирующий эффект, недоступный для GF. Электронное промотирование калием снижает эффективную степень окисления железа до 2,082, создавая защитный потенциал на активных центрах. Это препятствует их переокислению парами воды, образующимися в ходе реакций, и сохраняет катализатор в рабочем состоянии. Согласно экспериментальным данным, скорость расходования CO на образце 5KGF при 50%-ном содержании CO<sub>2</sub> в смеси остается стабильной на уровне 31,866 мкмоль/(г·ч) (таблица 2), в то время как базовый феррит GF в присутствии диоксида углерода стремительно теряет активность. Таким образом,

совокупность анионного дефицита и электронной модификации центров железа превращает 5KGF в принципиально более эффективную каталитическую систему, способную осуществлять селективную и стабильную конверсию сложных смесей оксидов углерода в ценное нефтехимическое сырье [6,7].

### Заключение

Проведенное исследование подтвердило, что образец 5KGF (Gd<sub>0,95</sub>K<sub>0,05</sub>FeO<sub>3-δ</sub>) значительно превосходит базовый феррит GF по всем ключевым параметрам. Главным фактором превосходства стал десятикратный рост концентрации вакансий кислорода (δ=0,509 против 0,051 у GF), обеспечивший аномально высокую адсорбционную емкость поверхности.

В реакциях гидрирования модификация калием позволила не только увеличить конверсию CO до 68% при 723 K, но и направить процесс в сторону селективного образования легких олефинов C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>. В отличие от чистого феррита, система 5KGF проявила исключительную устойчивость к дезактивации парами воды и зауглероживанию. Синергизм высокой анионной дефектности и электронного промотирования делает образец 5KGF эффективным и стабильным катализатором для переработки техногенных газов.

### Список литературы

- Laksmono J.A. et al. Adsorption capacity study of ethanol-water mixture for zeolite, activated carbon, and polyvinyl alcohol // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing. - 2018. - Vol. 105, № 1. DOI 10.1088/1755-1315/105/1/012025.
- Hasan Rupam T. et al. Ethanol adsorption onto various metal organic frameworks for cooling applications // Thermal Science and Engineering Progress. Elsevier Ltd. - 2023. - Vol. 37. - P. 101602. DOI:10.1016/j.tsep.2022.101602.
- Huo P. et al. Insight into the Adsorption Process of Ethanol and Water on the Pore Structure and Surface Chemistry Properties Engineered Activated Carbon Fibers // Ind Eng Chem Res. American Chemical Society. - 2021. - Vol. 60, № 30. - P. 11141-11150.
- Lv X. et al. Experimental study of ethanol adsorption using a multistage bubbling fluidized bed // Process Safety and Environmental Protection. Institution of Chemical Engineers. - 2019. - Vol. 125. - P. 64-70.
- Zhang X. et al. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review // Journal of Hazardous Materials. - 2017. - Vol. 338. - P. 102-123.
- Madero-Castro R.M. et al. Adsorption of Linear Alcohols in Amorphous Activated Carbons: Implications for Energy Storage Applications // ACS Sustain Chem Eng. American Chemical Society. - 2022. - Vol. 10, № 20. - P. 6509-6520.
- Hussin F. et al. A breakthrough adsorption study of modified activated carbon using different environmentally friendly activating agents // Environmental Engineering Research. Korean Society of Environmental Engineers. - 2024. - Vol. 29, № 1. - P. 230005. <https://doi.org/10.4491/eer.2023.005>.

УДК 631.4

Покровский С.Я., Журавлева О.С.

## Методы обработки и анализа данных при моделировании динамики гумификации

Покровский Савва Ярославович – студент группы МТ-17; sova012@gmail.com;

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; zhuravleva.o.s@muctr.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены методы обработки и анализа данных для моделирования динамики гумификации почв. Описана интеграция разнородных данных и ключевые методы: геостатистика, геоинформационный анализ и машинное обучение. Приведены примеры практического применения и обсуждаются ограничения подходов. Выделены перспективы гибридных моделей для прогнозирования изменений почвенного органического вещества.*

*Ключевые слова: гумификация, моделирование, почвенный гумус, машинное обучение.*

## Methods of data processing and analysis in modeling the dynamics of humification

Pokrovskii S.Y., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses methods of data processing and analysis for modeling the dynamics of soil humification. The integration of heterogeneous data and key methods are described: geostatistics, geoinformation analysis and machine learning. Practical application examples are given and limitations of the approaches are discussed. The prospects of hybrid models for predicting changes in soil organic matter are highlighted.*

*Key words: humification, modeling, soil humus, machine learning.*

### Введение

Стабильная органическая фракция почвы, гумус, играет фундаментальную роль в поддержании ее плодородия, водоудерживающей способности и функционирования экосистем. Почвы представляют собой крупнейший наземный резервуар углерода, и динамика органического вещества в них напрямую связана с глобальным углеродным циклом. Углубленное понимание процессов гумификации, то есть трансформации растительных и животных остатков в гуминовые вещества, критически важно для прогнозирования последствий изменения климата, оценки устойчивости агроэкосистем и разработки стратегий рационального землепользования. Математическое моделирование служит основным инструментом для формализации этих сложных биохимических и физических процессов [1]. Однако построение адекватных моделей сталкивается с рядом вызовов, главным из которых является необходимость работы с большими объемами разнородных, часто пространственно привязанных данных. Это обуславливает активное развитие и внедрение методов их обработки и анализа, заимствованных из науки о данных, геоинформатики и смежных областей.

### Теоретический обзор и методы обработки данных

Процесс гумусообразования представляет собой результат биохимической трансформации органического материала под действием почвенных микроорганизмов и абиотических факторов. Образующийся гумус повышает структурную стабильность почвы, ее буферную емкость и способность удерживать питательные элементы. Для анализа органического вещества применяются как

качественные методы (например, спектроскопия), так и количественные, включая расчет индексов гумификации [2].

Основная сложность моделирования динамики гумуса заключается в необходимости интеграции данных из принципиально разных источников. К ним относятся:

- Полевые и лабораторные данные: результаты химических анализов на содержание органического углерода, гранулометрический состав, показатели кислотности и другие физико-химические свойства;
- Дистанционные данные: многозональные и гиперспектральные снимки со спутников (Landsat, Sentinel) и беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), предоставляющие информацию о состоянии растительного покрова и некоторых поверхностных свойствах почв;
- Климатические данные: временные ряды температуры, осадков, влажности воздуха;
- Пространственные данные: цифровые модели рельефа (ЦМР), карты почв, растительности и типов землепользования;

Первоначальный этап работы – предобработка данных – направлен на приведение этой разнородной информации к единому формату, пригодному для анализа. Он включает очистку от выбросов и аномалий, интерполяцию пропущенных значений, геопривязку всех слоев к единой системе координат и нормализацию признаков. Для обработки спектральных данных используются методы фильтрации шумов и вычисления вегетационных

индексов (например, NDVI). В современных исследованиях эти процедуры часто автоматизируются с использованием языков программирования R и Python, а также специализированных ГИС-пакетов (QGIS, SAGA GIS, ArcGIS) и облачных платформ, таких как Google Earth Engine, которые предоставляют доступ к обширным архивам спутниковых данных [3].

#### Методы анализа данных

Для анализа собранных и обработанных данных применяется несколько взаимодополняющих классов методов.

Статистические и геостатистические методы формируют основу для первичного изучения данных. Описательная статистика, корреляционный и регрессионный анализ, дисперсионный анализ позволяют оценить связи между содержанием гумуса и различными факторами (например, параметрами рельефа). Методы снижения размерности, такие как анализ главных компонент (PCA), помогают выявить скрытые закономерности в многомерных наборах данных. Геостатистика, в частности анализ вариограмм и метод кригинга, является стандартным инструментом для анализа и интерполяции пространственно распределенных данных, позволяя учесть автокорреляцию между соседними точками наблюдений. Регрессионный кригинг, сочетающий регрессионную модель с кригингом остатков, часто используется для повышения точности карт гумуса, используя в качестве предикторов данные дистанционного зондирования или морфометрические показатели рельефа [4].

Геоинформационный анализ (ГИС) обеспечивает технологическую основу для интеграции всех пространственных слоев данных. Концептуальной рамкой для отбора предикторов при цифровом картографировании почв служит модель SCORPAN, учитывающая факторы почвообразования: почву (Soil), климат (Climate), организмы (Organisms), рельеф (Relief), почвообразующую породу (Parent material), время (Age) и пространственное положение (spatial Location). Переменные рельефа, рассчитанные по ЦМР (высота, крутизна, экспозиция, индекс влажности), часто оказываются одними из наиболее информативных предикторов распределения гумуса, особенно в сложном рельефе [5].

Методы машинного обучения (МО) в последние годы стали активно применяться для анализа почвенных данных, особенно для задач регрессии и классификации. Алгоритмы «обучения с учителем» способны улавливать сложные нелинейные взаимосвязи между множеством предикторов и целевой переменной (например, содержанием гумуса). Наибольшей популярностью в задачах цифрового картографирования почв пользуются ансамблевые методы, такие как случайный лес (Random Forest) и градиентный бустинг (XGBoost, LightGBM), которые показывают высокую прогнозную точность и относительно устойчивы к переобучению. Для анализа многомерных спектральных данных и временных рядов начинают

применяться методы глубокого обучения, например, сверточные (CNN) и рекуррентные (LSTM) нейронные сети. Исследования показывают, что машинное обучение позволяет существенно повысить детальность и точность карт содержания органического углерода по сравнению с традиционными геостатистическими методами, особенно при наличии большого набора предикторов [6].

Процессно-ориентированные модели представляют другой важный класс инструментов. Такие модели, как RothC, Century или ROMUL, основаны на математическом описании биогеохимических процессов разложения и стабилизации органического вещества [7]. Они разделяют органическое вещество почвы на несколько концептуальных пулов (например, активный, медленный, пассивный), каждый со своей скоростью оборота, зависящей от температуры, влажности и других факторов. Эти модели незаменимы для долгосрочного прогнозирования динамики углерода и изучения сценариев изменения климата. Однако их калибровка и верификация требуют качественных экспериментальных данных.

#### Примеры применения и ограничения

Современные методы находят практическое применение в цифровом картографировании и мониторинге гумуса. Например, в работе Коноплиной Л. Ю. и др. для картирования гумуса пахотных почв Брянской области был применен алгоритм Voruta для отбора значимых предикторов из данных агрохимической службы и спутниковых снимков, а затем построена модель на основе случайного леса, позволившая создать карту с удовлетворительной точностью [6]. Другой пример – исследование Чащина А. Н. и соавторов, где комбинация высокодетальной съемки с БПЛА, ГИС-анализа рельефа и геостатистики позволила выявить влияние микрорельефа и процессов эрозии на пространственное распределение гумуса в пределах одного поля, продемонстрировав возможности точного локального картографирования [4].

Несмотря на значительный прогресс, современные подходы имеют ряд ограничений. Ключевой проблемой остается недостаток долгосрочных рядов высококачественных данных, необходимых для обучения и валидации как ML-моделей, так и процессно-ориентированных моделей [8]. Модели машинного обучения часто критикуют за «эффект черного ящика» – сложность интерпретации полученных взаимосвязей, что затрудняет их интеграцию с фундаментальным почвенным знанием. Существуют также проблемы с вычислительной сложностью при обработке больших массивов данных и риском переобучения моделей при работе с ограниченными или коррелированными наборами предикторов.

#### Заключение

Моделирование динамики гумификации находится на стыке почвоведения, экологии, геоинформатики и науки о данных. Развитие методов

обработки и анализа данных открывает новые возможности для создания высокоточных пространственно-временных моделей содержания органического вещества в почвах. Наиболее перспективным направлением представляется развитие гибридных подходов, которые сочетают в себе физическую обоснованность процессно-ориентированных моделей с мощностью методов машинного обучения для работы с большими данными и выявления сложных паттернов. Такой синтез позволит преодолеть существующие ограничения, связанные с неопределенностью данных и сложностью систем, и создаст основу для надежного прогнозирования изменений почвенного покрова в контексте глобальных изменений и задач устойчивого развития сельского хозяйства. Дальнейший прогресс будет связан с расширением сетей мониторинга, включая наземные сенсоры и данные IoT, развитием облачных вычислительных платформ и совершенствованием интерпретируемых методов искусственного интеллекта.

#### Список литературы

1. Комаров А. С., Хораськина Ю. С., Быховец С. С. и др. Моделирование динамики органического вещества и элементов почвенного питания в минеральной почве и лесной подстилке // Математическая биология и биоинформатика. – 2012. – Т. 7. – № 1. – С. 162–176.
2. Kwiatkowska-Malina J. Qualitative and quantitative soil organic matter estimation for sustainable soil management // Journal of Soils and Sediments. – 2018. – Vol. 18. – P. 2801–2812.
3. Иванова Т. Е., Смирнов И. В. и др. Методы цифровой обработки и анализа почвенных данных // ГеоСПЕКТР. – 2022. – № 4. – С. 45–62.
4. Чашин А. Н., Мудрых Н. М., Самофалова И. А. Пространственное моделирование содержания гумуса в почвах на основе БПЛА-съёмки // Почвы и окружающая среда. – 2023. – Т. 6. – № 3. – С. e226.
5. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital Terrain Modeling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications // Hydrological Processes. – 1991. – Vol. 5. – P. 3–30.
6. Коноплина Л. Ю., Мешалкина Ю. Л., Самсонова В. П., Голозубов О. М. Картографирование содержания гумуса в пахотных почвах Брянской области методами машинного обучения по данным Агрохимслужбы // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. – 2024. – Т. 79. – № 4. – С. 130–140.
7. Рыжова И. М., Романенков В. А., Степаненко В. М. Современное развитие моделей динамики органического вещества почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. – 2024. – Т. 79. – № 1. – С. 17–34.
8. Гопп Н. В., Мешалкина Ю. Л., Нарыкова А. Н. и др. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки (Forest Science Issues). – 2023. – № 1(61). – С. 17–44.

УДК 544.723.212

Ткабо Тевельде, Чередниченко А.Г.

**Влияние модификации азотной кислотой активированного угля АГ-3 на адсорбцию о-ксилола**

Ткабо Тевельде, аспирант 4-й года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва. Чередниченко Александр Генрихович, доктор химических наук, заведующий кафедрой Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В статье было изучено влияние различных концентраций азотной кислоты на модифицирование адсорбционных свойств активированного угля АГ-3. Показано, что использование 2 М раствора  $\text{HNO}_3$  привело к увеличению адсорбционной емкости сорбента на 21,1 % при поглощении паров о-ксилола по сравнению с немодифицированным образцом в условиях температуры 25 °С. Применение более высоких концентраций азотной кислоты снижало сорбционные показатели из-за повреждения пор сорбента. Кинетические исследования показали, что процесс поглощения паров о-ксилола хорошо описывается уравнением псевдо-первого порядка.*

*Ключевые слова:* активированный уголь, адсорбция ЛОС, модификация активированных углей, кинетика адсорбции о-ксилола

**THE EFFECT OF MODIFICATION OF ACTIVATED CARBON AG-3 BY NITRIC ACID ON THE ADSORPTION OF O-XYLENE**

Tkabo Tewelde, Cherednichenko A.G.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

*The article studied the effect of different concentrations of nitric acid on the modification of the adsorption properties of activated carbon AG-3. It was shown that the use of a 2 M  $\text{HNO}_3$  solution led to an increase in the adsorption capacity of the sorbent by 21.1% when absorbing o-xylene vapors compared with an unmodified sample at a temperature of 25 °C. The use of higher concentrations of nitric acid reduced sorption rates due to damage to the pores of the adsorbent. Kinetic studies have shown that the absorption of o-xylene vapors is well described by a pseudo-first-order equation.*

*Keywords:* activated carbon, VOC adsorption, modification of activated carbons, kinetics of o-xylene adsorption

**Введение**

Летучие органические соединения (ЛОС) представляют собой серьёзную опасность для окружающей среды и здоровья человека из-за их токсических свойств и широкого промышленного использования [1]. Среди них изомеры ксилола занимают заметное место [2]. Их атмосферное окисление приводит к образованию смога [3], а воздействие может вызвать неврологические и респираторные проблемы, начиная от раздражения до хронического бронхита [4]. Адсорбция считается эффективным и экономичным методом удаления ЛОС благодаря своей простоте и эффективности [5]. Активированные угли с высокой площадью поверхности и пористостью широко используются для адсорбции вредных химических соединений, однако они часто могут проявлять низкую эффективность по отношению к определённым ЛОС [6]. Модификация поверхности, особенно окисление азотной кислотой ( $\text{HNO}_3$ ), может повысить адсорбционную способность активированного угля за счёт введения кислородсодержащих функциональных групп и улучшения поровых характеристик [7, 8]. Поэтому изучение влияния концентрации  $\text{HNO}_3$  на модифицирование поверхности угольных адсорбентов и последующую адсорбцию о-ксилола является актуальной задачей.

**Экспериментальная часть**

Активированный уголь АГ-3 был химически модифицирован путём окисления 2М, 4М и 6М

водными растворами  $\text{HNO}_3$  при 100 °С в течение 2 часов. После охлаждения образцы фильтровались, тщательно промывались дистиллированной водой до нейтрального pH и сушили в шкафу при 110 °С до постоянной массы. Полученные материалы были обозначены как НАС-2, НАС-4 и НАС-6 соответственно. Динамика процесса адсорбции паров о-ксилола исходным коммерческим и модифицированным углем АГ-3 была исследована с использованием гравиметрического метода при температуре 25 °С [9]. Масса адсорбированного о-ксилола на грамм АГ-3 (г/г) определялась по следующей формуле:

$$q_t = \frac{m_t - m_0}{m_0}$$

где  $q_t$  — количество адсорбированного о-ксилола в однограммовом активированном угле, г/г;  $m_0$  и  $m_t$  — это масса АГ-3 в начале эксперимента и в определенный момент времени (г).

Равновесная адсорбционная емкость ( $q_e$ ) для каждого образца адсорбента определяли в момент окончания изменения массы исследуемого активированного угля. Кинетические экспериментальные данные были проанализированы с использованием уравнений Лагергрена псевдо-первого порядка, Хо-Маккея псевдо-второго порядка, Эловича и Морриса [10].

## Обсуждение результатов

Кинетика адсорбции о-ксилола как на исходном коммерческом, так и на  $\text{HNO}_3$ -модифицированном АГ-3 показала быстрое начальное поглощение, за

которым следовал более медленный подход к равновесию, что указывает на то, что адсорбция сначала происходит на доступных поверхностных участках, а затем замедляется по мере их заселения.

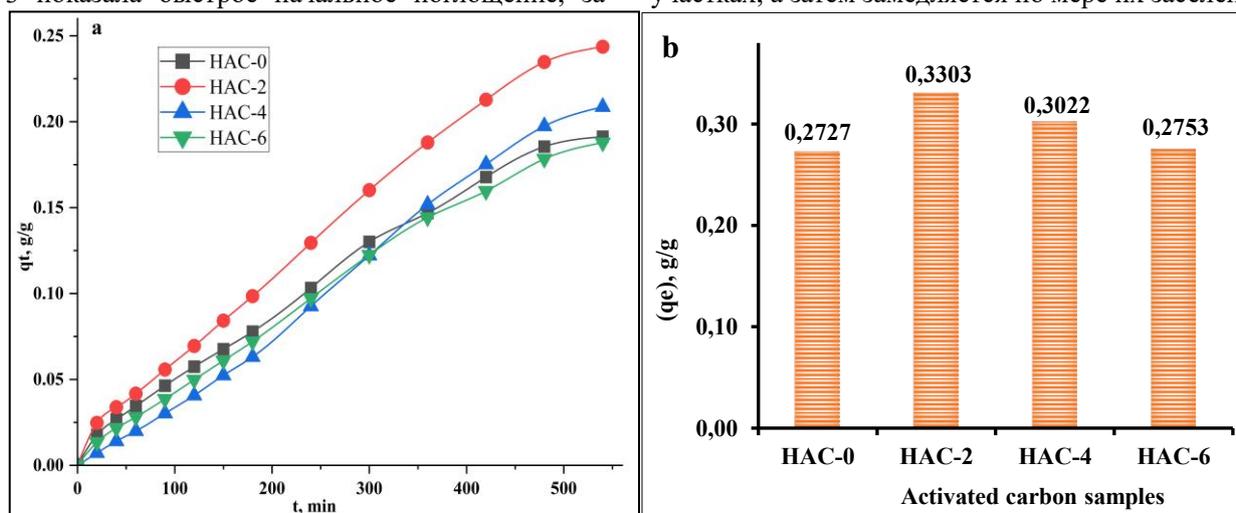


Рис. 1. Кинетика (а) и равновесная ёмкость (б) о-ксилола в коммерческом (НАС-0) и модифицированном  $\text{HNO}_3$  сорбенте АГ-3

Модификация  $\text{HNO}_3$  заметно повлияла на кинетику адсорбции и ёмкость кислорода на активированном угле АГ-3 (рис. 1). При этом образец НАС-2 демонстрировал наивысшую скорость адсорбции. Для этого материала равновесную удельную ёмкость увеличила на 21,1% по сравнению с немодифицированным образцом. В отличие от этого, НАС-4 и НАС-6 показали более низкие результаты (10,8% и 0,95% соответственно). Это указывает на низкую эффективность использования более высоких концентраций азотной кислоты при модификации угольного адсорбента. Увеличение сорбционных свойств образцом НАС-2 объясняется введением кислородсодержащих функциональных групп, способствующих более сильному взаимодействию с о-ксилолом [7]. Однако чрезмерное окисление поверхности при более высоких концентрациях  $\text{HNO}_3$ , очевидно, приводит к повреждению пор, снижая эффективность адсорбции. Таким образом, контролируемое поверхностное окисление активированного угля АГ-3 с использованием 2М водного раствора  $\text{HNO}_3$

обеспечивает оптимальный баланс между получаемой функциональностью поверхности и доступностью пор для эффективной адсорбции о-ксилола.

Результаты кинетических исследований паров о-ксилола исходным и модифицированными образцами адсорбента АГ-3 были обработаны с использованием моделей псевдо-первого порядка, псевдо-второго порядка, Эловича и Морриса-Вебера. Коэффициент корреляции ( $R^2$ ) и кинетические параметры, полученные из каждой модели, дают представление о этапах процесса адсорбции и его механизме (таблица 1, рис. 2).

Согласно полученным данным использование модели псевдо-первого порядка стабильно демонстрировало наилучшее соответствие экспериментальным данным для всех образцов активированных угольных адсорбентов. Это говорит о том, что процесс адсорбции о-ксилола, в первую очередь, определяется наличием доступных участков на поверхности активированного угля.

Таблица 1: Кинетические параметры адсорбции о-ксилола на немодифицированном и  $\text{HNO}_3$ -модифицированном АГ-3

Кинетические параметры	Активированный уголь			
	НАС-0	НАС-2	НАС-4	НАС-6
Экспериментальный				
$q_e$ , г/г	0.2727	0.3303	0.2879	0.2623
Уравнение псевдопервого порядка				
$K_1$ , мин <sup>-1</sup>	0.0025	0.0025	0.0023	0.0021
$q_e$ , г/г	0.3435	0.3195	0.3291	0.2849
$R^2$	0.9895	0.9892	0.9783	0.9930
Уравнение псевдовторого порядка				
$k_2$ , г/г*мин	0.0026	0.0027	0.0004	0.0015
$q_e$ , г/г	0.5501	0.5137	0.9121	0.5866
$R^2$	0.7036	0.7036	0.6662	0.6604

Уравнение Эловича				
$\alpha$ , г/г *мин	0.0025	0.0023	0.0016	0.0018
$\beta$ , г/г	13.9276	15.4083	16.1551	17.6678
$R^2$	0.8648	0.8296	0.8296	0.8679
Уравнение Морриса-Вебера				
K	0.0127	0.0119	0.0116	0.0100
C	-0.0566	-0.0529	-0.0723	-0.0497
$R^2$	0.9757	0.9757	0.9583	0.9771

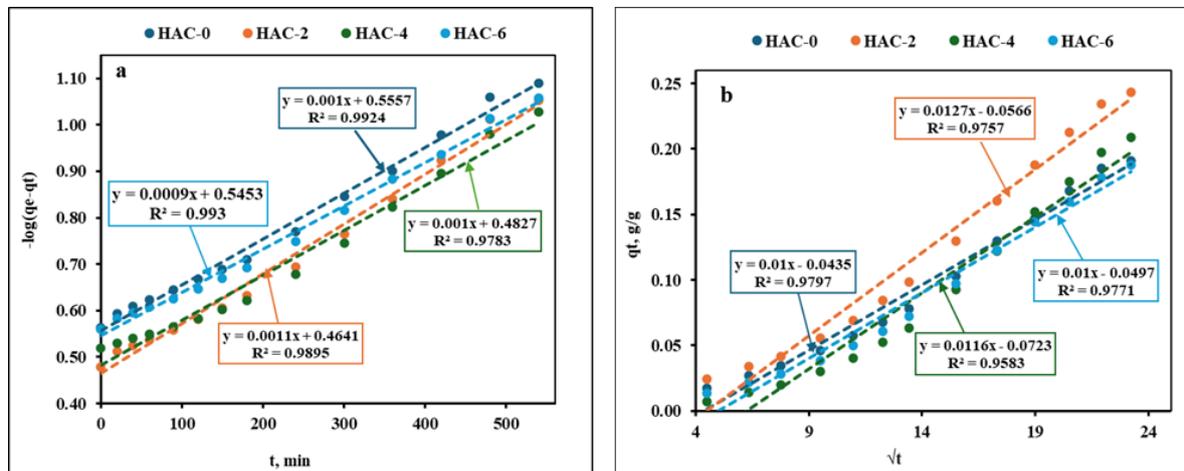


Рис. 2. Кинетика адсорбции паров АГ-3, описанная моделями псевдопервого порядка (а) и внутриворонной диффузии Морриса–Вебера (б)

При использовании модели Морриса-Вебера относительно высокие значения  $R^2$  свидетельствуют о том, что внутриворонная диффузия играет значительную роль в кинетике адсорбции. Проведенное исследование демонстрирует, что модификация  $\text{HNO}_3$  при определенных условиях способно значительно повысить адсорбционную способность угольных сорбентов по отношению к парам о-ксилола, что определяет потенциал синтезированных модифицированных материалов для эффективного удаления ароматических ЛОС в промышленной и бытовой сфере.

#### Список литературы

- Zhou X., Zhou X., Wang C., Zhou H. Environmental and human health impacts of volatile organic compounds: A perspective review // *Chemosphere*. - 2023. - Vol. 313. - P. 137489.
- Shojaee B.S., Dashtian A.H., Keykhosravi S.S., Saryazdi M.J., Afrough M.J. Modeling the environmental, health, and safety aspects of xylene isomer emission from storage tanks in petrochemical industries, Iran // *Environ Monit Assess*. - 2021. Vol. 193, № 12.
- Duan W., Meng F., Wang F., Liu Q. Environmental behavior and eco-toxicity of xylene in aquatic environments: A review // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. - 2017. - Vol. 145. - P. 324–332.
- Saeedi M., Malekmohammadi B., Tajalli S. Interaction of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene with human's body: Insights into characteristics, sources and health risks // *Journal of Hazardous Materials Advances*. - 2024. - Vol. 16.
- Wu M., Zhao Z., Cai G., Wang C., Cheng G., Wang Xi. Adsorption behavior and mechanism of benzene, toluene and m-xylene (BTX) solution onto kaolinite: Experimental and molecular dynamics simulation studies // *Sep Purif Technol*. - 2022. - Vol. 291.
- Isinkaralar K., Turkyilmaz A., Lakestani S. Equilibrium study of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) from gas streams by black pine cones-derived activated carbon // *Environ Technol Innov*. - 2023. - Vol. 31.
- Rong X., Cao Q., Gao Y., Du X., Dou H., Yan M., Li S., Wang Q., Zhang Z., Chen B. Performance optimization and kinetic analysis of  $\text{HNO}_3$  coupled with microwave rapidly modified coconut shell activated carbon for VOCs adsorption // *Front Energy Res*. - 2023. - Vol. 10.
- Wolak E., Orzechowska-Zięba A. Change of the surface and structure of activated carbon as a result of  $\text{HNO}_3$  modification // *Adsorption*. - 2024. - Vol. 30, № 2. - P. 121–128.
- Kasatkin E.M., Akhmedova L.S., Markova E.B., Boldyrev V.S., Averina Yu.M., Cherednichenko A.G. Investigation of Benzene Vapors Adsorption by Activated Carbons AR-A, AR-B and Baojun Activated Carbon's COALS // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*. - 2022. - № 4. - P. 110–124.
- Guo X., Wang J. A general kinetic model for adsorption: Theoretical analysis and modeling // *J Mol Liq*. - 2019. - Vol. 288. - P. 111100.

УДК 544.723.212

Анистратов Н. А., Муштаков А. Г., Моисеева А. Р., Маркова Е. Б.

### Адсорбция красителей жёлтый солнечный закат и кристаллический фиолетовый на MIL-100(Fe)

Анистратов Николай Александрович, аспирант 1-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Муштаков Антон Георгиевич, аспирант 4-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Моисеева Анна Романовна, студент 2-го курса группы Нхмбд-02-24 направления «Химия»

Маркова Екатерина Борисовна, кандидат химических наук, доцент кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва.

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В данной работе исследовалась кинетика адсорбции водных растворов красителей кристаллический фиолетовый (КФ) и жёлтый солнечный закат (СЗ) на образце металлоорганического координационного полимера (МОКП) FeBTC со структурой типа MIL-100(Fe). Для описания кинетики адсорбции использовались модели псевдо-первого и псевдо-второго порядков, а также модель Еловича. В результате выяснено, что адсорбция КФ и СЗ подчиняется модели псевдо-второго порядка, а также что КФ хемосорбируется на FeBTC. Ключевые слова: адсорбция красителей, МОКП, кинетика адсорбции, MIL-100(Fe)*

### ADSORPTION SUNSET YELLOW AND CRYSTAL VIOLET DYES ON MIL-100(Fe)

Anistratov N. A., Mushtakov A. G., Moiseeva A. R., Markova E. B.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*In this study, the adsorption kinetics of Crystal Violet (CV) and Sunset Yellow (SY) dyes from aqueous solutions on a FeBTC sample of a metal-organic framework (MOF) with the MIL-100(Fe) structure type. Pseudo-first and pseudo-second order models, and Elovich model were used for the kinetic data interpretation. As a result, the CV and SY adsorption was described with the pseudo-second order model, and the CV was chemisorbed on FeBTC.*

*Keywords: dyes adsorption, MOF, adsorption kinetics, MIL-100(Fe)*

### Введение

Загрязнение водных ресурсов окружающей среды – один из глобальных вызовов современности [1]. Из-за высоких темпов индустриализации в 20 веке выросли производственные мощности промышленности, а следовательно, и побочные эффекты от данного явления, в том числе и отходы производства.

Среди отходов встречаются органические красители. Они также могут оказывать негативное воздействие на состояние окружающей среды [2]. Помимо этого, они могут попадать в растения, а значит, и в продукты питания. Из-за этого возможно превышение допустимой дозы потребления красителей как пищевых добавок, что может привести к негативным последствиям для здоровья [3].

Для удаления органических красителей используются различные методы – физические, химические и биологические [4]. К физическим методам относят адсорбцию – поглощение красителя на поверхности адсорбента. Этот метод не затратен с экономической точки зрения и прост в исполнении [5]. К тому же можно подобрать подходящий в конкретном случае тип адсорбента, что также упрощает процесс [6]. К химическим методам относят окисление органических красителей, а также фотоокисление [7]. Достаточно активно используется окисление с помощью ультрафиолетового излучения,

а также гомогенное и гетерогенное окисление. Также существуют различные биологические методы удаления красителей с помощью микроорганизмов [8].

Как уже было сказано, адсорбция – это эффективный и дешёвый метод удаления красителей. Однако необходимо учитывать характеристики адсорбента. Для повышения эффективности процесса стремятся увеличить площадь удельной поверхности и пористость [9].

В качестве адсорбентов могут выступать металлоорганические координационные полимеры (МОКП). Это соединения, состоящие из ионов или кластеров металлов и органических молекул-лигандов [10]. За счёт наличия полостей у данных соединений высокая удельная поверхность и пористость, что повышает их адсорбционную способность. Одним из представителей МОКП является MIL-100(Fe), обладающий высокой пористостью и площадью удельной поверхности, а также активно использующийся в качестве сорбента [11].

Целью данной работы является оценка адсорбции красителей КФ и СЗ на МОКП MIL-100(Fe). Оба выбранных красителя вредны для здоровья. Так, КФ является генотоксичным и карциногенным веществом, которое также угнетает рост микроорганизмов [12]. СЗ является пищевой добавкой, активно используемой в кондитерской и

пищевой отраслях. Поэтому необходимо контролировать, сколько данного вещества попадает в организм человека.

### Экспериментальная часть

Образец FeBTC, где BTC – бензол-1,3,5-трикарбоксилат ( $C_6H_3(COO)_3$ ), был получен и охарактеризован в работе [13]. Исследование кинетики адсорбции красителей КФ и СЗ из водных растворов проводилось при комнатной температуре. Процесс контролировался при помощи спектрофотометра УФ-6900 (диапазон  $\lambda$  от 200 до 800 нм, шаг сканирования 0.5 нм). Перед началом эксперимента были получены градуировочные графики зависимости оптической плотности раствора красителя от концентрации. Для этого приготовили серию растворов с заданной концентрацией (от 5 до 60 мкмоль/л) и записывали их спектры поглощения, после чего строили калибровочную зависимость  $A = f(C)$ , которая подчиняется закону Бугера-Ламберта-Бера:

$$A = \epsilon Cl$$

где  $A$  – оптическая плотность;  $\epsilon$  – молярный коэффициент поглощения, л/(моль·см);  $l$  – длина оптического пути, см (в нашем случае равно длине кюветы – 1 см).

Для проведения кинетического эксперимента взяли водные растворы красителей с концентрацией 60 мкмоль/л и поместили в пробирки на 10 мл. Затем записали спектры исходных растворов. Далее в пробирки добавили навески образца (0.0102 г и 0.0101 г для растворов КФ и СЗ соответственно). Изменение концентрации фиксировали спектрофотометрически каждые 5-10 минут. Для этого отбирали аликвоту объёмом 5 мл, центрифугировали и записывали спектр полученного центрифугата. После этого аликвоту возвращали в исходный раствор.

Для проведения адсорбционного опыта снимали спектры поглощения растворов красителей с заданной концентрацией (от 5 до 60 мкмоль/л). В растворы объёмом 10 мл помещали 10 мг сорбента и оставляли на 5 дней. После этого растворы центрифугировали и записывали спектры поглощения полученных растворов.

Из полученных спектров поглощения при помощи калибровочных графиков получили концентрации в момент времени  $C_\tau$  по закону Бугера-Ламберта-Бера.

Величина избыточной адсорбции по Гиббсу в момент времени вычислялась по следующей формуле:

$$\Gamma_\tau = \frac{C_0 - C_\tau}{m} \times V$$

где  $\Gamma_\tau$  – избыточная адсорбция по Гиббсу в момент времени  $\tau$ , моль/г;  $C_0$  – начальная концентрация, моль/л;  $C_\tau$  – концентрация в момент времени  $\tau$ , моль/л;  $m$  – масса образца, г;  $V$  – объём раствора, мл.

Равновесная избыточная адсорбция по Гиббсу вычислялась по следующей формуле:

$$\Gamma_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \times V$$

где  $\Gamma_e$  – избыточная адсорбция по Гиббсу в момент времени  $\tau$ , моль/г;  $C_0$  – начальная концентрация, моль/л;  $C_e$  – концентрация в момент времени  $\tau$ , моль/л;  $m$  – масса образца, г;  $V$  – объём раствора, мл.

Степень поглощения красителя рассчитывалась по следующей формуле:

$$\alpha = \left(1 - \frac{C_0}{C_e}\right) \times 100\%,$$

где  $\alpha$  – степень поглощения, %;  $C_0$  и  $C_e$  – начальная и равновесная концентрации соответственно, моль/л. Полученные кинетические данные обрабатывали с использованием модели псевдо-первого порядка в линейном виде [14]:

$$\ln(\Gamma_e - \Gamma_\tau) = \ln(\Gamma_e) - k_1 \tau$$

где  $\Gamma_e$  – равновесная избыточная адсорбция по Гиббсу, моль/г;  $k_1$  – константа скорости адсорбции по модели асевдо-первого порядка, мин<sup>-1</sup>;  $\tau$  – момент времени, мин; псевдо-второго порядка [15, 16]:

$$\frac{\tau}{\Gamma_\tau} = \frac{\tau}{\Gamma_e} + \frac{1}{k_2 \Gamma_e^2}$$

где  $k_2$  – константа скорости адсорбции по модели псевдо-второго порядка, г/(мкмоль·мин); и модели Еловича в линейном виде при условии, что  $\alpha\beta\tau \gg 1$  [17]:

$$\Gamma_\tau = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln(\tau)$$

где  $\alpha$  – константа уравнения Еловича, равная начальной скорости адсорбции, г/(моль·мин);  $\beta$  – константа уравнения Еловича, равная константе десорбции, г/моль.

Для описания изотерм адсорбции использовали модель Дубинина-Радушкевича:

$$\ln(\Gamma) = \ln(\Gamma_\infty) - \left(\frac{RT}{E}\right)^2 \ln^2\left(\frac{C_s}{C_e}\right),$$

где  $\Gamma$  – адсорбция по Гиббсу, мкмоль/г;  $\Gamma_\infty$  – предельная адсорбция на монослое, мкмоль/г;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8.314 Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К;  $E$  – характеристическая энергия адсорбции, Дж/моль;  $C_s$  – растворимость, моль/л.

### Обсуждение результатов

Образец FeBTC однофазный со структурой типа MIL-100(Fe), площадь удельной поверхности по данным низкотемпературной адсорбции азота  $S_{\text{ВЕТ}} = 1310 \text{ м}^2/\text{г}$  [13]. Кинетические кривые процесса адсорбции красителей представлены на рис. 1. Можно заметить, что адсорбция СЗ и КФ в начале увеличивается резко, затем в случае СЗ адсорбция растёт медленно, а в случае с КФ адсорбция идёт медленнее (Рис. 1).

Полученные кривые были обработаны при помощи кинетических моделей адсорбции в линейном виде. На Рис. 2 показаны данные кинетики адсорбции красителей на FeBTC в линейных координатах моделей Еловича и псевдо-второго порядка.

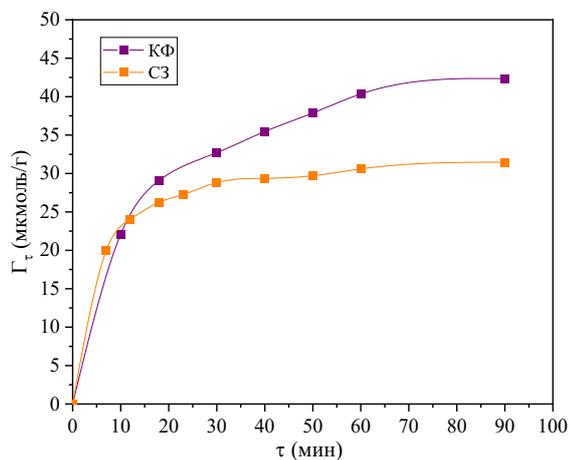


Рис. 1. Кинетические кривые адсорбции кристаллического фиолетового (КФ) и солнечного заката (СЗ) образцом FeBTC

В Таблице 1 показаны результаты обработки экспериментальных данных при помощи различных моделей. Как можно заметить, модель псевдо-второго порядка хорошо описывает экспериментальные данные. Это значит, что при адсорбции происходят межмолекулярные взаимодействия «адсорбат-адсорбат», а также что адсорбция протекает подобно реакции второго порядка [18]. Также, в случае с КФ, модель Еловича подходит для описания кинетики адсорбции, в отличие от СЗ (Рис. 2). Это значит, что во время поглощения красителя на FeBTC происходит хемосорбция. Поглощение СЗ на FeBTC, согласно результату обработки экспериментальных данных в линейных координатах модели Еловича, не подчиняется данной модели.

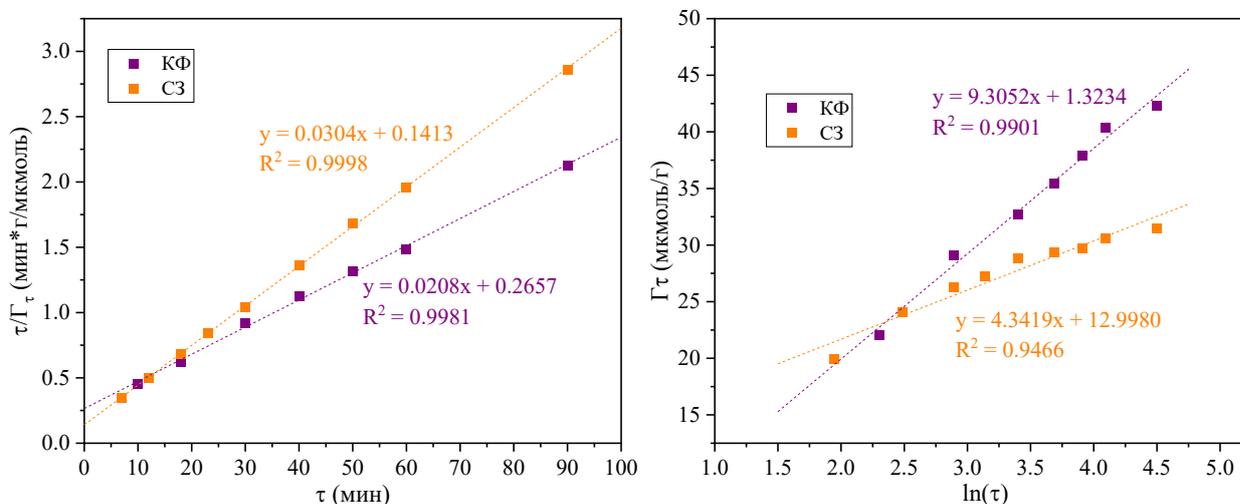


Рис. 2. Данные кинетики адсорбции КФ и СЗ на FeBTC в линейных координатах моделей Еловича (справа) и псевдо-второго порядка (слева)

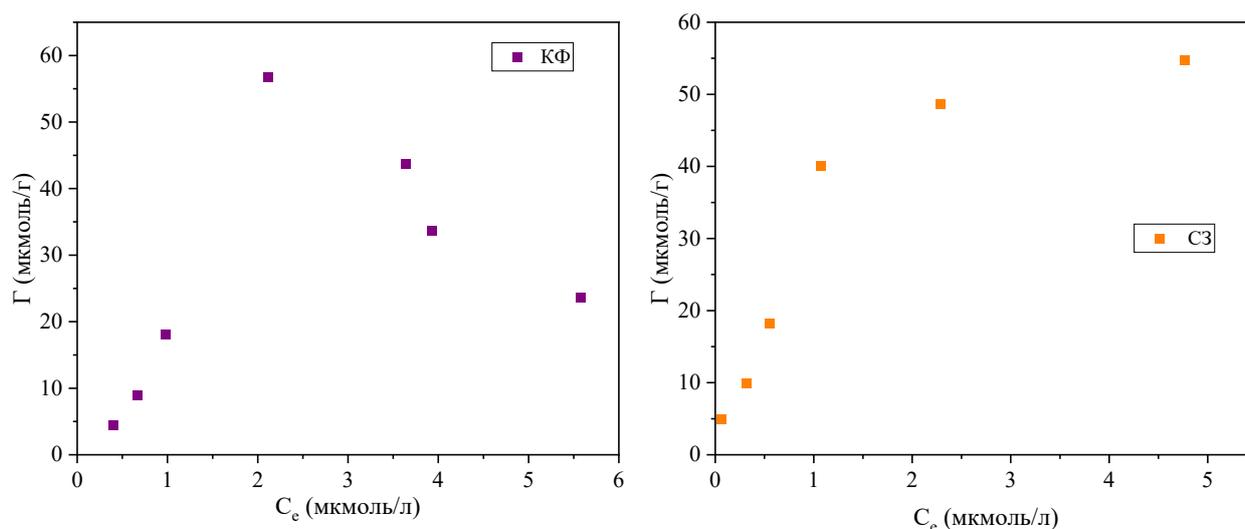


Рис. 3. Изотермы адсорбции КФ (слева) и СЗ (справа) на образце FeBTC

Таблица 1. Параметры кинетических моделей адсорбции красителей на FeBTC.

Краситель	Параметры модели и их значения				
	Псевдо-второй порядок		Елович		
	$k_2$ , г/(мкмоль·мин)	$R^2$	$\alpha$ , г/(мкмоль·мин)	$\beta$ , г/мкмоль	$R^2$
КФ	0.0016	0.9981	10.7273	0.1075	0.9901
СЗ	0.0065	0.9998	4.4620	0.2303	0.9466

Изотермы адсорбции представлены на Рис.3. Для КФ адсорбция сначала возрастает, а потом падает. Такое поведение может быть объяснено хемосорбцией красителя на образце, о чём говорит модель Еловича. Адсорбция СЗ же только растёт. Данные изотермы адсорбции СЗ были обработаны согласно модели Дубинина-Радушкевича (Рис. 4).

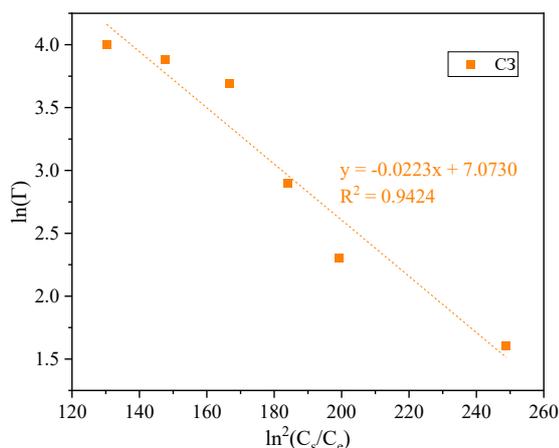


Рис. 4. Данные адсорбции СЗ на образце FeBTC в линейных координатах модели Дубинина-Радушкевича

О различном типе адсорбции также говорит степень извлечения красителей, полученная спустя 5 дней. Результаты представлены на рис. 5. Видно, что КФ поглотился в большей степени, чем СЗ. Видно, что присутствует отклонение от линейной зависимости. Это можно объяснить наличием мезопор в образце, в то время как теория Дубинина-Радушкевича описывает адсорбцию в микропорах [13].

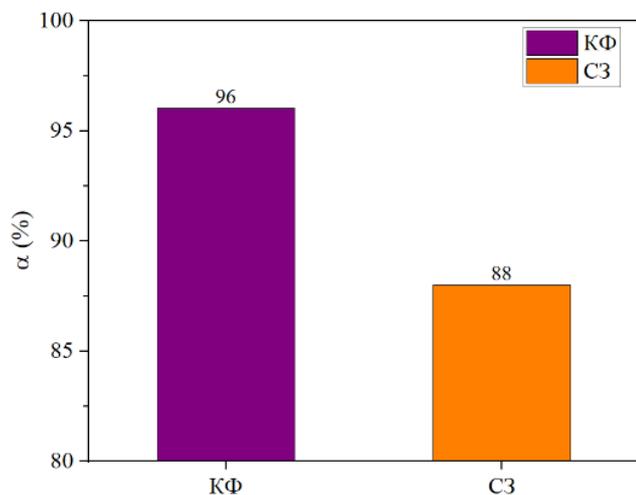


Рис. 5. Диаграмма степени извлечения КФ и СЗ на образце FeBTC

### Заключение

В данной работе была проведена адсорбция красителей кристаллический фиолетовый и жёлтый солнечный закат на образце FeBTC, соответствующим структуре типа MIL-100(Fe). В результате выявлено, что процесс адсорбции КФ и СЗ подчиняется модели псевдо-второго порядка. Также адсорбция КФ описывается кинетической моделью Еловича, что указывает на хемосорбцию. Изотерма адсорбции КФ не может быть описана моделью Дубинина-Радушкевича из-за, возможно, хемосорбции. Изотерма адсорбции СЗ отклоняется от модели Дубинина-Радушкевича из-за наличия мезопор в FeBTC. Полученные результаты могут быть использованы для создания сорбентов на основе MIL-100(Fe).

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № FSFZ-2024-0003).

### Список литературы

1. Deblonde T. et al. Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature // International Journal of Hygiene and Environmental Health. - 2011. - Vol. 214, Issue 6. -P. 442-448.
2. Ismail M. et al. Pollution, Toxicity and Carcinogenicity of Organic Dyes and their Catalytic Bio-Remediation // Current Pharmaceutical Design. - 2019. - Vol. 25, № 34. - P. 3645-3663.
3. Mota I. G. C. et al. Artificial dyes: Health risks and the need for revision of international regulations // Food Reviews International. - 2023. - Vol. 39, № 3. - P. 1578-1593.
4. Qiang Liu. Pollution and Treatment of Dye Waste-Water // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. - 2020. - Vol. 514. - P. 052001.
5. PiasKowsKi K. et al. Dye Removal from Water and Wastewater Using Various Physical, Chemical, and Biological Processes // Journal of AOAC INTERNATIONAL. - 2018. - Vol. 101, Issue 5, - P. 1371–1384.
6. Kyzas G. Z. et al. Green Adsorbents for Wastewaters: A Critical Review // Materials. - 2014. -Vol. 7(1). - P. 333-364.
7. Lagergren S. Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe // Bihang till Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens, Handlingar. – 1898. - P. 1–39.
8. Popli, S., Patel, U.D. Destruction of azo dyes by anaerobic-aerobic sequential biological treatment: a

review // Int. J. Environ. Sci. Technol. - 2015. - Vol. 12. - P. 405-420.

9. McKay G. Use of Adsorbents for the Removal of Pollutants from Wastewater // CRC Press, 1995. 208 p.

10. Furukawa H. et al. The Chemistry and Applications of Metal-Organic Frameworks // Science 2013. - Vol. 341. – P. 1230444.

11. Fang Y. et al. MIL-100(Fe) and its derivatives: from synthesis to application for wastewater decontamination // Environ Sci Pollut Res. - 2020. - Vol. 27. - P. 4703-4724.

12. Mani S., et al. Exposure to Crystal Violet, Its Toxic, Genotoxic and Carcinogenic Effects on Environment and Its Degradation and Detoxification for Environmental Safety // Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. - 2016. - Vol. 237. - P. 71-104.

13. Mushtakov A. et al. Targeted synthesis of MIL-100(Fe) with catalytic, absorption and antimicrobial properties // Chemical Engineering Science. - 2026. - Vol. 321, Part C. - P. 123038.

14. S. Lagergren. Zur theorie Der Sogenannten adsorption gelöster stoffe // Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar. - 1898. - Vol. 24. - P. 1-39.

15. Ho Y. S., Wase DAJ & CF Forster C. F. Removal of lead ions from aqueous solution using sphagnum moss peat as adsorbent // Water. - 1996. - Vol. 22, № 3. - P. 219-224.

16. Ho Y. S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // Process biochemistry. - 1999. – Vol. 34, №. 5. - P. 451-465.

17. Elovich S. Y. et al. Theory of adsorption from solutions of non electrolytes on solid (I) equation adsorption from solutions and the analysis of its simplest form,(II) verification of the equation of adsorption isotherm from solutions // Izv. Akad. Nauk. SSSR, Otd. Khim. Nauk. - 1962. – Vol. 2, №. 2. - P. 209-216.

18. L. Largitte et al. A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon // Chemical Engineering Research and Design. - 2016. - Vol. 109. - P. 495-504.

УДК 631.4

Криворотова С.А., Журавлева О.С.

### **Анализ возможностей традиционных статистических методов и современных алгоритмов машинного обучения для решения задач почвенного мониторинга**

Криворотова Софья Андреевна – магистр 1-го года обучения; 210686@muctr.ru;  
Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье проведен анализ методологического потенциала традиционных статистических методов и алгоритмов машинного обучения для решения актуальных задач почвенного мониторинга. Рассмотрены ключевые задачи: пространственное прогнозирование и цифровое картографирование почвенных свойств, оценка плодородия и состояния почв, атрибуция источников загрязнения и первичный разведочный анализ данных. Проведен анализ конкретных примеров. Сделан вывод о синергетическом эффекте от интеграции подходов в рамках гибридных моделей, что открывает путь к созданию более мощного аналитического инструментария для перехода от констатирующего контроля к предиктивному управлению почвенными ресурсами.*

*Ключевые слова: почвенный мониторинг, статистический анализ, цифровое почвенное картографирование, пространственное прогнозирование, оценка плодородия почв, анализ загрязнения.*

### **Analysis of the Capabilities of Traditional Statistical Methods and Modern Machine Learning Algorithms for Solving Soil Monitoring Tasks**

Krivorotova S.A., Zhuravleva O.S.

D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*This article analyzes the methodological potential of traditional statistical methods and machine learning algorithms for addressing pressing soil monitoring challenges. Key tasks are considered: spatial forecasting and digital mapping of soil properties, assessment of soil fertility and condition, attribution of pollution sources, and primary exploratory data analysis. A case study is analyzed. A conclusion is drawn about the synergistic effect of integrating approaches within hybrid models, which opens the way to the creation of more powerful analytical tools for the transition from ascertaining control to predictive soil resource management.*

*Key words: soil monitoring, statistical analysis, digital soil mapping, spatial forecasting, soil fertility assessment, pollution analysis.*

#### **Введение**

Почва является критически важным и уязвимым природным ресурсом, от состояния которого напрямую зависит продовольственная безопасность и устойчивость экосистем. Современный почвенный мониторинг генерирует обширные массивы многомерных данных, анализ которых традиционными методами становится недостаточно эффективным для выявления сложных закономерностей и построения точных прогнозных моделей.

Актуальность настоящего исследования обусловлена насущной потребностью в разработке и апробации передовых аналитических методик, обеспечивающих трансформацию парадигмы от пассивного констатирующего контроля к активному предиктивному управлению состоянием почвенных ресурсов. Цель работы — провести сравнительный анализ методологического потенциала классических статистических методов и алгоритмов машинного обучения для решения ключевых задач почвенного мониторинга.

#### **Основная часть**

Почва является не инертным субстратом, а динамичной химической системой, одновременно служа результатом и ареной интенсивных природных

процессов. Рациональное использование и охрана этого бесценного химического продукта природы является обязательным условием для продовольственной и экологической безопасности человечества [1, 2]. Её ценность как незаменимого и условно возобновляемого ресурса обусловлена комплексом экосистемных (продукционная, гидрологическая, буферная, средообразующая) и глобальных биосферных функций [2, 3]. Эффективный мониторинг и управление этим ресурсом требуют количественной оценки его ключевых атрибутов, таких как содержание органического вещества, ёмкость катионного обмена, кислотно-основные и окислительно-восстановительные свойства, гранулометрический состав и степень загрязнения.

Современные системы мониторинга генерируют обширные пространственно-временные данные, анализ которых методами классической статистики (дисперсионный, корреляционный, факторный анализ) часто недостаточен для выявления сложных нелинейных зависимостей [4]. Это обуславливает необходимость применения алгоритмов машинного обучения (МО), таких как Random Forest, Gradient Boosting и нейронные сети, которые позволяют строить предиктивные модели для оценки

плодородия, классификации типов почв и прогнозирования динамики загрязнений, эффективно обрабатывая многомерные и неструктурированные данные. Современный анализ почвенных данных должен основываться на комбинированном методологическом подходе, интегрирующем

проверенные статистические методы для первичного описания и проверки гипотез и передовые алгоритмы МО для прогнозного моделирования. Сравнительный анализ этих подходов применительно к ключевым задачам мониторинга систематизирован в Таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ методов для решения основных задач почвенного мониторинга

Классические статистические методы	Методы машинного обучения
<b>1. Задача пространственного прогнозирования и цифрового картографирования</b>	
<p><b>Достоинства:</b> учитывают пространственную автокорреляцию (кригинг), дают оценку ошибки прогноза, результаты хорошо интерпретируемы.</p> <p><b>Недостатки:</b> дают излишне сглаженные карты, слабо учитывают влияние внешних факторов (рельеф, спутниковые данные), требуют выполнения строгих статистических допущений (стационарность).</p>	<p><b>Достоинства:</b> способны моделировать сложные нелинейные связи с множеством предикторов, обеспечивают более высокую детализацию и точность прогноза.</p> <p><b>Недостатки:</b> модели работают как «чёрный ящик», сложно интерпретировать вклад отдельных факторов, высок риск переобучения при малом объеме данных.</p>
<b>2. Классификация и оценка состояния</b>	
<p><b>Достоинства:</b> высокая интерпретируемость (дендрограммы кластеризации, факторные нагрузки PCA). Идеальны для исследовательского анализа структуры данных и проверки гипотез.</p> <p><b>Недостатки:</b> точность классификации может уступать методам МО, особенно при сложных, нелинейных границах между классами.</p>	<p><b>Достоинства:</b> обеспечивают высокую точность автоматической классификации, способны работать с нелинейно разделимыми классами.</p> <p><b>Недостатки:</b> требуют больших размеченных наборов данных для обучения. Логика принятия решений моделью часто неочевидна.</p>
<b>3. Выявление взаимосвязей и атрибуция источников</b>	
<p><b>Достоинства:</b> методы PCA и кластерного анализа предоставляют наглядное и статистически обоснованное разделение элементов по источникам (техногенный/природный)</p> <p><b>Недостатки:</b> могут не улавливать сверхсложные, скрытые взаимодействия в очень больших наборах данных.</p>	<p><b>Достоинства:</b> обеспечивают высокую точность автоматической классификации, способны работать с нелинейно разделимыми классами.</p> <p><b>Недостатки:</b> требуют больших размеченных наборов данных для обучения. Логика принятия решений моделью часто неочевидна.</p>
<b>4. Первичный разведочный анализ (EDA) и проверка гипотез</b>	
<p><b>Достоинства:</b> фундаментальная основа, дескриптивная статистика, проверка на нормальность, ANOVA — стандартные и необходимые первые шаги для любого анализа, позволяющие понять данные и задать направление исследованию.</p> <p><b>Недостатки:</b> ограничены в анализе неструктурированных данных (текст, изображения). Визуализация многомерных зависимостей может быть сложной.</p>	<p><b>Достоинства:</b> обеспечивают высокую точность автоматической классификации, способны работать с нелинейно разделимыми классами.</p> <p><b>Недостатки:</b> требуют больших размеченных наборов данных для обучения. Логика принятия решений моделью часто неочевидна. Отсутствие формального статистического вывода (p-values, доверительные интервалы) для проверки гипотез.</p>

Результаты применения методов МО и статистики к почвенным данным

1. Пространственное прогнозирование и цифровое картографирование

В статье [6] приведена сравнительная оценка эффективности Random Forest (RF) и геостатистических моделей для построения карт запасов органического углерода почвы (SOC) в горном регионе Гималаев. Использовались данные 83 проб, а в качестве предикторов – спектральные индексы Sentinel-2 и параметры рельефа. Модели валидировались методом сквозной перекрёстной проверки. Коэффициент детерминации  $R^2$  для RF

был также выше. На этом примере в Гималаях показано, что метод машинного обучения Random Forest обеспечивает более высокую точность прогноза по сравнению с традиционными геостатистическими методами. Среднеквадратичная ошибка (RMSE) прогноза составила 8.21 для Random Forest против 15.60 у обычного кригинга и 17.73 у регрессионного кригинга. Авторы [6] отмечают, что RF лучше уловил пространственную вариабельность SOC благодаря учёту влияния вспомогательных переменных, тогда как ОК/РК дали более сглаженные карты.

2. Классификация и оценка состояния

При решении задачи классификации уровня обеспеченности почв питательными элементами модели машинного обучения демонстрируют высокую эффективность. Например, в статье [7], модель на основе метода опорных векторов (SVM) показала точность свыше 80%, а нейросеть типа GRNN достигла точности около 93%. Эти результаты показывают, что алгоритмы машинного обучения могут стать основой для создания экспертных систем поддержки принятия решений в сельском хозяйстве, обеспечивая автоматическую и точную оценку состояния почвенного плодородия.

3. Выявление взаимосвязей и атрибуция источников

В ходе исследования [8] загрязнения почв тяжелыми металлами в Танзании комбинация классических статистических методов — анализа главных компонент (PCA) и кластерного анализа — успешно разделила металлы по происхождению. Были выделены группы техногенных (Pb, Cr, Cu, Mn) и природных (Cd, As, Ni) элементов. Кластеризация данных также позволила выявить 2–3 группы точек с разным уровнем комплексного загрязнения, что легло в основу районирования территории по степени экологической опасности. Этот пример иллюстрирует незаменимость интерпретируемых статистических методов для научного обоснования и принятия управленческих решений.

4. Первичный разведочный анализ (EDA) и проверка гипотез

В статье [9] подчеркивается фундаментальная роль классической статистики на начальном этапе работы с данными. Такие методы, как дескриптивная статистика, проверка распределений на нормальность и дисперсионный анализ (ANOVA), являются стандартными и необходимыми инструментами для первичного понимания данных, формулирования гипотез и определения направления дальнейшего углубленного анализа с применением более сложных алгоритмов.

#### Заключение

Проведенный анализ характеризует области эффективного применения каждого подхода. Классическая статистика сохраняет ключевые позиции в задачах, требующих интерпретируемости и обоснования (EDA, атрибуция источников), в то время как машинное обучение демонстрирует

превосходство в задачах точного прогнозирования и сложной классификации. Наиболее перспективным путем является не выбор одного метода, а их синергия в рамках гибридных моделей, что позволяет создать более мощный и надежный аналитический инструментарий для современного почвенного мониторинга.

#### Список литературы

1. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 354 с.
2. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв: учебник. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. – 364 с.
3. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. – М.: Наука, 1990. – 270 с.
4. Nazir N., Rasool A., Sofi J. A., Gautam R., Farooque T., Biswas A. Comparison of Random Forest and Kriging Models for Soil Organic Carbon Mapping in the Himalayan Region of Kashmir // Land. 2022. Vol. 11, No. 12. P. 2180 .
5. Коноплина Л. Ю., Мешалкина Ю. Л., Самсонова В. П., Голозубов О. М. Картографирование содержания гумуса в пахотных почвах Брянской области методами машинного обучения по данным агрохимслужбы // Вестник МГУ. Серия 17. Почвоведение. 2024. № 1. С. (в печати) .
6. Гопп Н. В., Мешалкина Ю. Л., Нарыкова А. Н., Плотникова А. С., Чернова О. В. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // Вопросы лесной науки. 2023. № 1. С. 1–20 .
7. Triantakonstantis D., Karakostas A. Soil Organic Carbon Monitoring and Modelling via Machine Learning Methods Using Soil and Remote Sensing Data // Agriculture. 2025. Vol. 15, No. 9. P. 910
8. Li H., Leng W., Zhou Y., Chen F., Xiu Z., Yang D. Evaluation Models for Soil Nutrient Based on Support Vector Machine and Artificial Neural Networks // The Scientific World Journal. 2014. Art. 478569. P. 1–7.
9. Kaplan S., Ropelewska E., Günaydın S., Sabancı K., Çetin N. Machine learning and computer vision technology to analyze and discriminate soil samples // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. 19945. P. 1–12

УДК 544.723.212

Фионова Е.А., Фионов Ю.А.

**Контроль дисперсии CeO<sub>2</sub> методом абсорбционной спектроскопии in-situ в системах Ni-Al-Ce с различными соотношениями Al/Ce**

Фионова Елена Александровна, магистрант 1-го года обучения, кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Фионов Юрий Александрович, аспирант 4-го года обучения, кафедры Физической и коллоидной химии РУДН, Россия, Москва;

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В работе предложена методика определения оптимальной температуры прокаливания, обеспечивающую сохранение высокой дисперсности диоксида церия, у катализаторов системы Ni-Al-Ce. Подход основан на применении in-situ спектроскопии в видимом и ближнем ИК-диапазонах (VIS-NIR) для мониторинга состояния ионов Ce<sup>3+</sup>. Установлено, что отклонение интенсивности поглощения Ce<sup>3+</sup> от экспоненциальной температурной зависимости свидетельствует о начале формирования объемной фазы CeO<sub>2</sub> и снижении дисперсности. На основе полученных данных определена оптимальная температура прокаливания образцов — 700°C. При данных условиях на поверхности фиксируется образование фазы NiO и сохраняется равномерное распределение CeO<sub>2</sub> по поверхности катализатора. В то же время повышение температуры до 950°C ведет к образованию шпинели NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и к спеканию носителя. Эффективность приведенной методики подтверждается данными H<sub>2</sub>-ТПВ, показавшими практически полное отсутствие пиков восстановления объемного CeO<sub>2</sub> в образцах, прокаленных при 700°C.*

*Ключевые слова: системы Ni-Al-Ce, абсорбционная спектроскопия, дисперсность CeO<sub>2</sub>, температура прокаливания*

**CONTROL OF CeO<sub>2</sub> DISPERSION BY IN-SITU ABSORPTION SPECTROSCOPY IN Ni-Al-Ce SYSTEMS WITH DIFFERENT Al/Ce RATIOS**

Fionova E.A, Fionov Y.A

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*This study presents a method for determining the optimal calcination temperature to preserve the high dispersion of cerium dioxide in Ni-Al-Ce system catalysts. The approach is based on in-situ visible and near-infrared (VIS-NIR) spectroscopy for monitoring the state of Ce<sup>3+</sup> ions. It was found that a deviation of the Ce<sup>3+</sup> absorption intensity from the exponential temperature dependence indicates the onset of bulk CeO<sub>2</sub> phase formation and a decrease in dispersion. Based on the obtained data, the optimal calcination temperature for the samples was determined to be 700°C. Under these conditions, NiO phase formation is observed on the surface, while a uniform distribution of CeO<sub>2</sub> across the catalyst surface is maintained. At the same time, increasing the temperature to 950°C leads to the formation of NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel and support sintering. The effectiveness of the proposed method is confirmed by H<sub>2</sub>-TPR data, which showed an almost complete absence of reduction peaks for bulk CeO<sub>2</sub> in samples calcined at 700°C.*

*Keywords: Ni-Al-Ce systems, absorption spectroscopy, dispersion of CeO<sub>2</sub>, calcination temperature*

**Введение**

Значительные выбросы углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосферу являются одной из главных причин глобального изменения климата, ведущее к экстремальным погодным явлениям, потере биоразнообразия и усилению парникового эффекта. Технологии улавливания и переработки CO<sub>2</sub> стали крайне важными как в научных исследованиях, так и в промышленности для решения перечисленных проблем и достижения углеродной нейтральности [1]. Одним из перспективных процессов переработки CO<sub>2</sub> является углекислотная конверсия, позволяющая перерабатывать CO<sub>2</sub> с органическим сырьем в синтез-газ [2]. Однако, данный процесс протекает при высоких температурах (>1200°C), что приводит к необходимости использования катализаторов. Наиболее эффективными катализаторами углекислотной конверсии являются системы,

содержащие благородные металлы, однако высокая стоимость данных катализаторов (до 15 вес. % металла на катализатор) препятствует их внедрению в промышленность.

Экономически-выгодной альтернативой являются Ni-содержащие системы, так как они обладают низкой стоимостью и высокой активностью [3]. Однако, никелевые катализаторы обладают низкой стабильностью из-за дезактивации активной поверхности никелевых наночастиц за счет углеродных отложений [4].

Решить проблему дезактивации можно с помощью носителя, обладающего способностью к окислению углерода, который образуется на частицах никеля. Традиционно считается, что CeO<sub>2</sub> выступает одним из таких носителей [5]. Механизм окисления углерода на поверхности CeO<sub>2</sub> включает в себя цикл возникновения и исчезновения кислородных вакансий, позволяющих оксиду церия обладать высокой

кислородной емкостью и подвижностью [6]. Чистый  $\text{CeO}_2$  имеет низкую удельную поверхность, что затрудняет его использование в виде носителя активной фазы для реакции углекислотной конверсии и приводит к необходимости добавления дополнительных соединений, способствующих высокому распределению  $\text{CeO}_2$  [7]. Одним из таких соединений является  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , обладающий высокой удельной поверхностью и отличным взаимодействием с активной фазой никеля [8].

Одним из основных факторов, влияющих на дисперсность фазы  $\text{CeO}_2$  в сложнооксидном носителе является температура прокаливания образца. Например, было показано, что высокие температуры прокаливания  $\text{CeO}_2$ -содержащих систем приводят к крупным частицам оксида церия, что отрицательным образом влияет на каталитическую активность [9]. Несмотря на это, исследований распределения  $\text{CeO}_2$  во время прокаливания ранее не проводилось.

Таким образом, целью данной работы стало нахождение оптимальной температуры прокаливания для сохранения высокой дисперсности фазы  $\text{CeO}_2$  образцов 10Ni/25Al-75Ce, 10Ni/50Al-50Ce, 10Ni/75Al-25Ce. Для выполнения этой цели были использованы метод абсорбционной спектроскопии *in-situ* во время нагрева и термопрограммируемое восстановление водородом ( $\text{H}_2$ -ТПВ) для определения пика, характерного для восстановления объемной фазы  $\text{CeO}_2$ .

#### Экспериментальная часть

Синтез образцов с 10 вес. % Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$  ( $\text{Al}/\text{Ce} = 0.33, 0.5, 0.67$ ) осуществлялся по методу Печини. Рассчитанные навески нитратов солей никеля, алюминия и церия (Ce), а также лимонная кислота (ЛК) и этиленгликоль (ЭГ) (соотношение ЛК:ЭГ:Ce составляло 3:12:1) растворялись в стакане, при добавлении дистиллированной воды, перемешивались и ставились на 45 минут на нагревательную химическую плитку с температурой нагрева до 500 °С. Полученный после нагрева порошок, был перетерт в агатовой ступке и подвергнут прокаливанию до необходимой температуры со скоростью нагрева 15 °С/мин, и выдерживался 1 час на максимальной температуре.

Для изучения активности катализатора перед началом экспериментов проводилось термопрограммируемое восстановление, чтобы оценить эффективность *in-situ* восстановления активной фазы в зависимости от состава образца. В этом процессе 75 мг катализатора помещали в U-образную трубку, которую нагревали до 900 °С с линейной скоростью 10 °С/мин в потоке газовой смеси  $\text{H}_2/\text{Ar}$ , содержащей 5 об.% водорода, при скорости потока 50 мл/мин. Концентрация водорода измерялась с использованием детектора по теплопроводности. Полученные данные анализировались с помощью программы Origin.

Спектры поглощения образцов во время прокаливания на воздухе в режиме *in-situ* записывались с помощью полуавтоматической установки, включающей в себя модуль нагрева тигля с образцом,

модуль записи сигнала диффузного отражения от поверхности порошка и модуль, включающий в себя галогенную лампу. Нагрев на установке с получением спектров поглощения *in-situ* осуществлялся со скоростью 15 °С/мин до температуры 950 °С. Запись спектра поглощения рассчитывалась из теории Кубелки-Мунка и производилась каждые 3 секунды в диапазоне 400-900 нм.

#### Обсуждение результатов

Образцы 10 вес. % Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$  с различным отношением Al/Ce – 0.33, 0.5, 0.66 (Ni/25Al, Ni/50Al, Ni/75Al соответственно), полученные синтезом по методу Печини, были исследованы на установке, позволяющей записывать спектры поглощения в процессе нагрева образца до 950 °С. Для удобства восприятия данных длина волны-поглощение-температура, была выбрана длина волны, в которой находится поглощение от  $\text{Ce}^{3+}$  – 476 нм. Зависимости поглощения при 476 нм от температуры нагрева образцов с различным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  показаны на рисунке 1. Поскольку количество дефектов  $\text{Ce}^{3+}$  пропорционально содержанию  $\text{CeO}_2$  на поверхности, то по поглощению дефектов  $\text{Ce}^{3+}$  возможно сделать заключение об относительной дисперсности оксида церия. Однако, концентрация дефектов  $\text{Ce}^{3+}$  также экспоненциально зависит от температуры нагрева на воздухе [10]. Значит отклонения от этой зависимости свидетельствуют об уменьшении  $\text{CeO}_2$  на поверхности – спекание в крупные кристаллиты.

Зависимости у всех образцов показывали стандартное для оксида церия экспоненциальное увеличение поглощения при 476 нм при повышении температуры. Для образцов Ni/25Al и Ni/75Al экспоненциальная зависимость поглощения  $\text{Ce}^{3+}$  от температуры наблюдалась до 700 °С, после чего происходило уменьшение, характерное для уменьшения поверхностной концентрации  $\text{CeO}_2$  – спекание в крупные кристаллиты. У образца Ni/50Al отклонение от экспоненциальной зависимости поглощения  $\text{Ce}^{3+}$  от температуры началось уже после 600 °С.

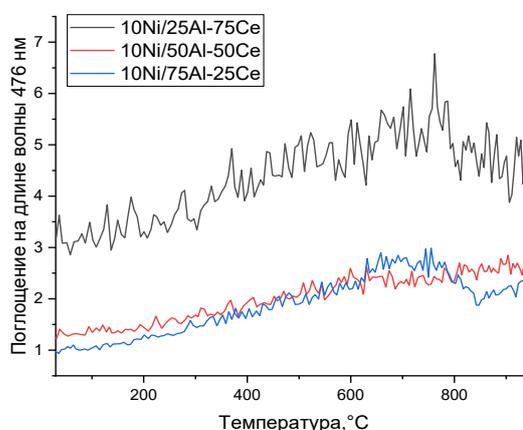


Рис. 1. Зависимость поглощения на длине волны 476 нм от температуры нагрева у образцов с различным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$

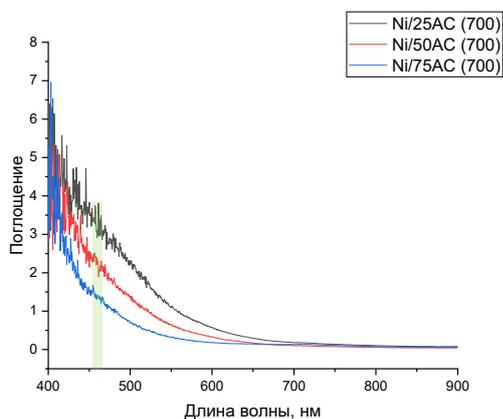


Рис. 2. Спектры поглощения образцов, прокаленных при 700 °С, записанные при комнатной температуре. Зеленым прямоугольником отмечена длина волны, которая использовалась при построении зависимостей поглощения  $Ce^{3+}$  от температуры нагрева образца.

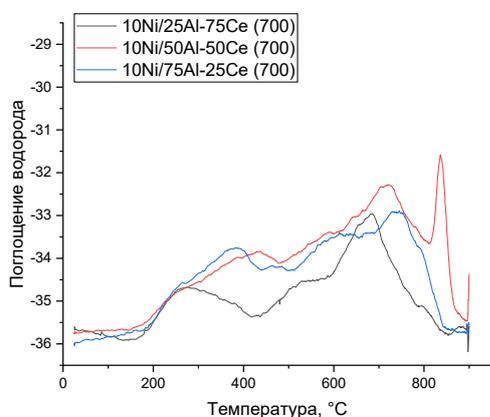


Рис. 3. Профили  $H_2$ -ТПВ у образцов с различным содержанием  $Al_2O_3$ , прокаленных при 700 °С.

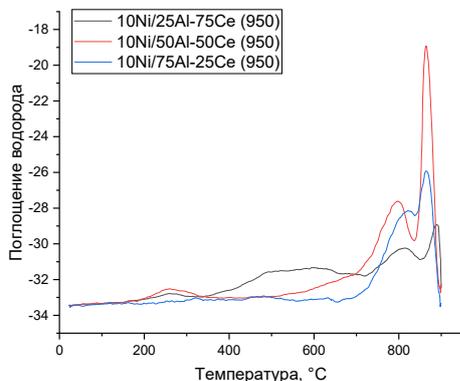


Рис. 4. Профили  $H_2$ -ТПВ у образцов с различным содержанием  $Al_2O_3$ , прокаленных при 950 °С.

Таким образом, по результатам абсорбционной спектроскопии in-situ в процессе прокаливания, была выбрана оптимальная температура прокаливания образцов – 700 °С. Для подтверждения сохранения дисперсности фазы  $CeO_2$  был использован метод термопрограммируемого восстановления водородом, в частности – присутствие/отсутствие пика поглощения водорода при ~850 °С, характерного для восстановления объемной фазы  $CeO_2$  [10]. Профили  $H_2$ -ТПВ для образцов, прокаленных при 950 °С, показали наличие пика объемной фазы  $CeO_2$  на всех образцах, причем на Ni/50AlCe этот пик был наиболее интенсивным. Для образцов, прокаленных при 700 °С

профили ТПВ отличались: для профилей Ni/25AlCe и Ni/75AlCe пика поглощения водорода объемной фазы  $CeO_2$  не наблюдалось, что подтверждает высокую дисперсность  $CeO_2$ . В то время, как профиль образца Ni/50AlCe показал наличие небольшого пика восстановления объемного  $CeO_2$ , что можно объяснить началом спекания фазы  $CeO_2$  уже при температуре выше 600 °С, как было показано на рис. 1.

#### Заключение

Таким образом, в данной работе был применен метод абсорбционной спектроскопии in-situ во время прокаливания 10 мас. % Ni/ $Al_2O_3$ - $CeO_2$  образцов с различным отношением Al/Ce (0,33, 0,5 и 0,66). Показано, что температуры начала снижения дисперсности  $CeO_2$  при прокаливании зависят от состава носителя, составляя 600 °С для образца с Al/Ce 0,5 и 700 °С для образцов с Al/Ce 0,33 и 0,66. Дисперсность  $CeO_2$  была успешно подтверждена с использованием метода термопрограммируемого восстановления водородом. Результаты этой работы позволяют сделать выводы о высокой надежности методики определения дисперсности  $CeO_2$  с помощью абсорбционной спектроскопии в процессе нагрева, что открывает новые подходы к контролю состояния катализаторов с высокой дисперсностью  $CeO_2$  – перспективных систем для процессов углекислотной конверсии.

#### Список литературы

- Hu L. et al. Chemico-biological conversion of carbon dioxide // Journal of Energy Chemistry. 2024. - Vol. 89. - P. 371-387.
- Speight J.G. Production of Synthesis Gas // Synthesis Gas: Production and Properties. Wiley, 2020. Chapter 2.
- Wang L. et al. Influence of preparation method on performance of Ni-CeO<sub>2</sub> catalysts for reverse water-gas shift reaction // Journal of Rare Earths. - 2013. - Vol. 31, № 6. - P. 559-564.
- Lai W. et al. The mitigation of carbon deposition for Ni-based catalyst in CO<sub>2</sub> reforming of methane: A combined experimental and DFT study // Carbon Capture Science & Technology. 2024. - Vol. 13. - Art. 100286.
- da Fonseca R.O. et al. Controlling carbon formation over Ni/CeO<sub>2</sub> catalyst for dry reforming of CH<sub>4</sub> by tuning Ni crystallite size and oxygen vacancies of the support // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization. - 2022. - Vol. 57. - Art. 101880.
- Liu H. et al. Low-temperature CO oxidation on oxygen vacancy-enriched Cu- and Ni-doped CeO<sub>2</sub> nanoparticles // Surfaces and Interfaces. - 2025. - Vol. 72. - Art. 107219.
- Hu Z. et al. Effect of CeO<sub>2</sub> nanoparticle sizes on catalytic performances of sulfated CeO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst in NH<sub>3</sub>-SCR reaction // Journal of Rare Earths. - 2024. - Vol. 42, № 3. - P. 515-522.
- De Piano G. et al. CO<sub>2</sub> methanation over nickel-CeO<sub>2</sub> catalyst supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Different impregnation strategies and Ni-Ce ratios // International Journal of Hydrogen Energy. - 2024. - Vol. 56. - P. 1007-1019.
- Yang X. et al. Effects of calcination temperature on morphology and structure of CeO<sub>2</sub> nanofibers and their photocatalytic activity // Materials Letters. - 2019. - Vol. 241. - P. 76-79.
- Maeng J.-H., Choi S.-C. The Effect of Cerium Reduction on Light Emission in Cerium-containing 20Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-25Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-55SiO<sub>2</sub> Glass // Journal of the Optical Society of Korea. - 2012. - Vol. 16, № 4. -P. 414-417.

УДК 667.61

Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я.

## Технология и физико-химические основы производства порошковых лакокрасочных покрытий

Пигас Александр Валерьевич – студент;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры ЛогЭКИ;

Покровский Савва Ярославович – студент.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены технологические особенности производства порошковых лакокрасочных покрытий (ЛКП) как специфической области лакокрасочной промышленности. Проанализированы основные методы получения порошковых материалов, а также физико-технологические особенности операций, определяющих качество конечного продукта. Выявлены ключевые факторы, влияющие на структуру покрытия, эксплуатационные свойства и стабильность рецептур. На основе анализа установлено, что современная стратегия производства порошковых ЛКМ опирается не на классические химические реакции, а на оптимизацию процессов смешивания, диспергирования и контролируемого формирования плёнообразующей системы.*

*Ключевые слова:* Порошковые лакокрасочные покрытия; технология производства; полимерные композиции; экструзия; смешивание в расплаве; диспергирование; пигменты; пленкообразователь.

## Technology and physico-chemical fundamentals of the production of powder coatings

Pigas A.V., Zvereva O.V., Pokrovskiy S.Y.

D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

*The article discusses the technological features of the production of powder coatings as a specific area of the paint and varnish industry. The main methods of obtaining powder materials are analyzed, as well as the physical and technological features of operations that determine the quality of the final product. The key factors influencing the coating structure, performance properties and stability of formulations have been identified. Based on the analysis, it has been established that the modern strategy for the production of powder coatings is based not on classical chemical reactions, but on optimizing the processes of mixing, dispersing and controlled formation of the film-forming system.*

*Keywords:* Powder coatings; production technology; polymer compositions; extrusion; mixing in a melt; dispersion; pigments; film-forming agent.

### Введение

Производство лакокрасочных материалов традиционно относится к категории химико-технологических процессов, однако в отличие от классических химических производств оно не опирается на универсальные рецептуры и четко регламентированные условия проведения реакций. Это связано с тем, что процесс формирования лакокрасочного продукта основан не на химическом взаимодействии реагентов при строго заданных температурах, давлениях и временных режимах, а на оптимальном сочетании стадий смешивания, диспергирования, модификации и последующего тестирования композиции. В результате технологический процесс носит преимущественно физический, а не химический характер, что обуславливает специфику оборудования и методологии управления качеством конечного продукта.

Особую значимость приобретают порошковые ЛКП, отличающиеся экологичностью, высокой степенью воспроизводимости характеристик и широким спектром применения в промышленности. В настоящей работе выполнен аналитический обзор методов производства порошковых материалов, а также рассмотрены особенности оборудования и

факторов, влияющих на микроструктуру и эксплуатационные параметры покрытия [1].

### Общие принципы производства порошковых ЛКМ

Технологическая схема производства порошковых лакокрасочных материалов характеризуется отсутствием единой универсальной модели и зависит от специфики используемых пленкообразующих агентов, пигментов и наполнителей. Операционные принципы, как правило, формируются исходя из требований конкретного продукта и свойств исходных компонентов. В отличие от процессов классической химии, здесь не используется строгий набор «условий реакции», а ключевую роль играет управление физическими процессами взаимодействия частиц в композиции.

Производственные операции подразделяются на периодические и непрерывные [2]. В лакокрасочной промышленности наиболее широкое распространение получил периодический метод, позволяющий гибко адаптировать рецептуру и корректировать параметры дисперсионной среды, что особенно важно в условиях многоассортиментного производства. Однако при больших объемах выпуска всё более актуальными становятся непрерывные

линии, обеспечивающие стабильность параметров и высокую производительность [1,3].

#### Методы получения порошковых покрытий

Современная практика производства порошковых ЛКП включает три основных технологических подхода: сухое смешивание, смешивание в расплаве и диспергирование пигментов с последующим удалением растворителя.

Сухое смешивание традиционно рассматривается как наиболее простой метод, реализуемый с использованием многовалковых или лопастных смесителей. Однако отсутствие тонкого регулирования приводит к неравномерному распределению пигментов, что ограничивает сферу

применения метода [4]. Более технологически совершенным является смешивание в расплаве, позволяющее обеспечить глубокую интеграцию пигмента в структуру полимерного связующего. Процесс проводится при температуре, превышающей температуру плавления пленкообразователя, что обеспечивает интенсивное смачивание наполнителя и формирование устойчивой макро- и микроструктуры. В качестве пленкообразующих агентов применяются эпоксидные, полиэфирные, акрилатные и уретановые олигомеры, а также низкомолекулярные полиэтилены, отличающиеся высокой стабильностью и способностью к образованию равномерной пленки (рис. 1).

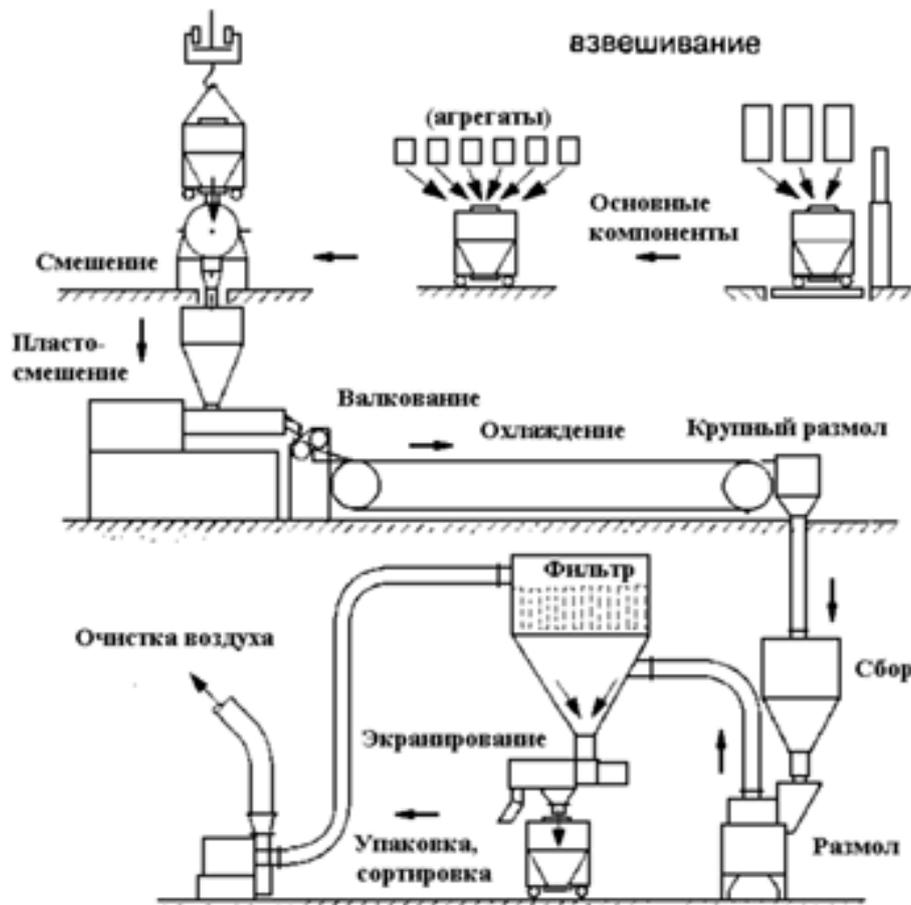


Рисунок 1 – Технологическая схема производства порошковых красок

Технологическая последовательность производства порошковых покрытий на основе смешивания в расплаве включает стадии дробления исходных компонентов до частиц размером 1–3 мкм, плавления полимера, интенсивного смешения, охлаждения композиции, её дальнейшего измельчения и просеивания для получения фракции с заданными характеристиками.

В большинстве случаев ключевая технологическая операция — диспергирование — осуществляется в экструдерах, поскольку альтернативное оборудование не обеспечивает требуемой интенсивности сдвиговых усилий и стабильности гранулометрического состава. Экструдеры, применяемые в порошковых линиях, могут быть одношнековыми или двухшнековыми. Двухшнековые аппараты, как правило, обеспечивают

более высокую степень гомогенизации, а также возможность регулирования структуры материала за счёт синхронного вращения шнеков и наличия дополнительных элементов перемешивания.

#### Оборудование для смешивания и экструзии

Основным рабочим узлом экструдера является шнек, расположенный в цилиндрическом корпусе и обеспечивающий механическую переработку композиции за счёт транспортирования, плавления и диспергирования компонентов. В одношнековых системах перемешивание осуществляется благодаря сложной геометрии и возвратно-поступательному движению шнека, тогда как в двухшнековых аппаратах используются ко-вращающиеся комбинированные шнеки, создающие интенсивные сдвиговые нагрузки, способствующие формированию равномерной структуры материала (рис. 2).

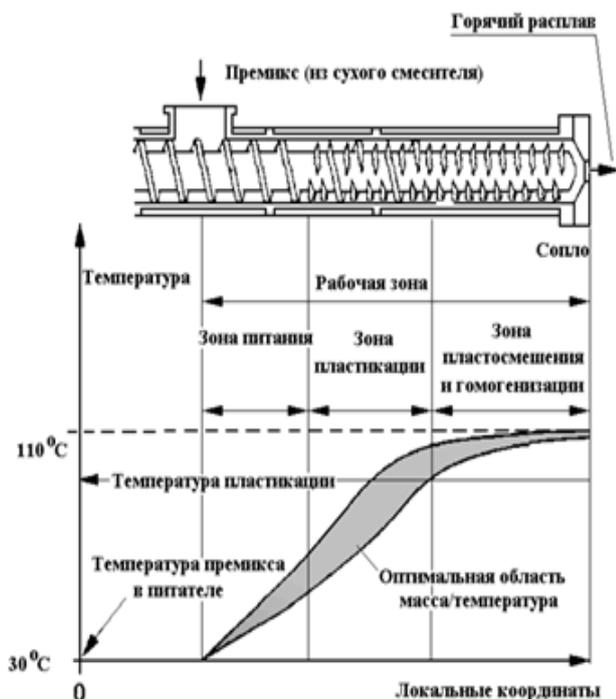


Рисунок 2 – Диаграмма профиля температур при диспергировании порошкового материала в одношнековом экструдере

### Технологическая природа порошковых покрытий

Появление порошковых ЛКП стало естественным этапом эволюции лакокрасочных материалов, направленной на повышение экологической безопасности и снижение затрат производственного цикла. Высокое содержание нелетучих компонентов позволяет значительно уменьшить расход покрытия, а бесрастворная технология обеспечивает минимальное воздействие на окружающую среду [3,5].

Современные порошковые покрытия демонстрируют высокие эксплуатационные характеристики: стойкость к коррозии, механическую прочность, стабильность структуры и выраженные декоративные свойства. Однако специфика рецептур требует учета особенностей применяемого пленкообразователя. Например, для прозрачных покрытий предпочтительными являются системы на эпоксидной основе.

На мировом рынке наиболее заметный рост демонстрируют порошковые составы на основе полиуретана, характеризующиеся повышенной устойчивостью к атмосферным воздействиям и высокими декоративными параметрами [6,7].

### Заключение

Анализ технологических принципов производства порошковых лакокрасочных материалов позволяет заключить, что их развитие обусловлено сочетанием физико-технологических процессов смешения, диспергирования и структурообразования. Отсутствие универсальных рецептур компенсируется высокой адаптивностью производства, возможностью гибкой корректировки композиции и эффективным применением экструзионного оборудования.

Методы смешивания в расплаве, внедрение современных двухшнековых экструдеров и использование стабильных полимерных систем обеспечивают формирование покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками. Порошковые ЛКП продолжают занимать значимую долю рынка, а полиуретановые системы демонстрируют устойчивый рост спроса благодаря совокупности технологических и экологических преимуществ [8-12].

Стратегическое значение развития порошковых материалов подтверждает их перспективность как основного направления совершенствования технологий защиты от коррозии и декоративной отделки изделий различного назначения.

### Список использованных источников

1. Брок Г., Гротеклаус П., Мишке П. Европейское руководство по лакокрасочным материалам и покрытиям. Пер. с англ. / Под ред. Л. Н. Машляковского. М.: Пэйнт-Медиа, 2004. 548 с.
2. ГОСТ 9. 402-80. Подготовка поверхности перед окрашиванием. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
3. Мюллер Б., Пот У. Лакокрасочные материалы и покрытия. Принципы составления рецептур: Пер. с нем. / Под ред. А. Д. Яковлева. М.: Пэйнт-Медиа, 2007. 237 с.
4. ГОСТ 9. 410-88. Покрытия порошковые полимерные. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
5. Гуцина Н.В., Яковлев А.Д., Гаринова Г.Н. Водно-суспензионные составы на основе твёрдых эпоксидных смол // Лакокрасочные материалы и их применение, 1999. - № 9.-С.11-12
6. Яковлев А.Д. Актуальные вопросы технологии порошковых лакокрасочных материалов и покрытий // Лакокрасочные материалы и их применение, 2002. – 306 с.
7. Яковлев А.Д. Порошковые краски. - Л.: Химия, 1987. – 216 с.
8. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. – Переизд. с изм. – М.: Изд-во стандартов, 1996.
9. ГОСТ Р 51694-2000. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. – М.: Изд-во стандартов, 2001.
10. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В. Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 183-192. – DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.
11. Бизнес-моделирование реинжиниринга химико-технологических систем / Б. Б. Богомолов, Ю. М. Аверина, А. И. Верхососова, М. Е. Дюженко // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 2. – С. 20-25.
12. Системный анализ оценки степени экологической полноценности лакокрасочного материала при организации замкнутых систем водообеспечения производств / Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, А. И. Верхососова, Н. В. Гусева // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 1(280). – С. 121-122

УДК 544

Хоанг Чунг Дат

## Химическое образование и наука Вьетнама. Путь развития и перспективные направления

Хоанг Чунг Дат, студент 1-го курса бакалавриата факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В статье представлены основные этапы развития химического образования и научных исследований в Социалистической Республике Вьетнам. Показан сложный путь, который прошел народ Вьетнама в борьбе за свою независимость, и взаимосвязь между образовательным уровнем населения и задачами по экономическому и социальному развитию страны. Стратегическими постановлениями правительства Вьетнама показано, что химия и передовые химические технологии являются фундаментальной движущей силой инноваций и экономического роста во Вьетнаме. Химическое образование Вьетнама ориентируется на подготовку высококвалифицированных кадров, которые в полной мере смогут работать и проводить научные исследования в области переработки нефти, природного газа и возобновляемых сырьевых ресурсов. Для решения этой задачи в стране открываются новые учебные заведения и исследовательские центры, а также осуществляется международное сотрудничество в вопросах науки и образования.*

*Ключевые слова: высшее образование во Вьетнаме, химические исследования, химическая технология*

## CHEMICAL EDUCATION AND SCIENCE IN VIETNAM. DEVELOPMENT PATH AND PROMISING DIRECTIONS

Hoang Chung Dat

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*The article presents the main stages of the development of chemical education and scientific research in the Socialist Republic of Vietnam. It shows the difficult path that the Vietnamese people have taken in the struggle for their independence, and the relationship between the educational level of the population and the tasks of economic and social development of the country. The Strategic Regulations of the Government of Vietnam show that chemistry and advanced chemical technologies are the fundamental driving force of innovation and economic growth in Vietnam. Vietnam's chemical education focuses on the training of highly qualified personnel who will be fully able to work and conduct scientific research in the field of refining oil, natural gas and renewable raw materials. To solve this problem, new educational institutions and research centers are being opened in the country, as well as international cooperation in science and education.*

*Keywords: higher education in Vietnam, chemical research, chemical technology*

### Введение

Химия является фундаментальной движущей силой инноваций и экономического роста во Вьетнаме. Это положение полностью соответствует мировым тенденциям экономического развития. Действительно, химическая наука и технология является одним из наиболее быстрым развивающимся направлением знаний, которое существенно влияет на состояние других областей науки и промышленного производства. Сегодня специалисты с химическим образованием успешно работают в пищевой и фармацевтической промышленности, на предприятиях химической и нефтехимической отрасли, в металлургии и материаловедении, в сельском хозяйстве и медицине. Исторические этапы развития высшего образования во Вьетнаме неразрывно связаны с историей Социалистической Республики Вьетнам.

### Химическое образование и наука во Вьетнаме

Во второй половине XIX века Вьетнам попал в колониальную зависимость от Франции. Страна была искусственно разделена на три части и вместе с Лаосом и Камбоджей вошла в состав Французского Индокитая. После окончания Второй мировой войны Франция стремилась восстановить свои колониальные владения и в конце 1946 года между Вьетнамской и Французской сторонами произошли первые военные столкновения. С 1950 года в ходе освободительной войны наступил перелом и летом 1954 года были подписаны соглашения, предусматривавшие полную независимость Вьетнама, Лаоса и Камбоджи. Однако вмешательство США во внутреннюю политику Вьетнама привело к возобновлению военных действий, которые закончились в 1976 году победой освободительных сил Вьетнама и созданию единой Социалистической Республики Вьетнам [1]. После длительного военного периода в историческом развитии страны наступило

время мирного экономического развития. Во время французского колониального господства на территории Вьетнама повсеместно внедрялись западные юридические нормы и институты, чуждые местному менталитету, что требовало введения определенных изменений. При этом определенная часть населения Вьетнама получила возможность приобщения к европейской культуре, науке и образованию, что сочеталось с развитием традиционных научных и прикладных направлений (производство металлов, керамики, крашение тканей, изготовление бумаги, производство рыбного соуса, изготовление средств народной медицины). В стране открывалась сеть школ, профессиональных училищ, институтов, университет Индокитая в г. Ханой. В 1990 году Национальное собрание Вьетнама приняло первые законы о частных предприятиях, об акционерных обществах и об обществах с ограниченной ответственностью, моделью для которых послужило французское законодательство. Но при этом государство оставило за собой право полного контроля над частным предпринимательством. Эти политические и экономические изменения были направлены на развитие экономики страны и создание новых предприятий по добыче и переработке природных ресурсов (бокситов, фосфатов, каменного угля, марганца, хромитов, месторождений нефти и газа на морском шельфе, лесных материалов и т.д.), которое невозможно было осуществить без создания системы подготовки квалифицированных кадров.

В сельском хозяйстве Вьетнама занято более половины населения страны. При этом по некоторым сельскохозяйственным продуктам республика занимает ведущие мировые позиции, что было бы невозможно без применения средств агрохимии. Например, сегодня Вьетнам является крупнейшим в мире экспортером кофейных зерен. В последние годы многие иностранные компании, особенно работающие в сфере бытовой электроники и высоких технологий (Samsung, LG Electronics, Nokia, Panasonic, Intel) переносят свои производственные и научно-исследовательские мощности из соседнего Китая во Вьетнам, чем стимулируют процесс обучения и подготовки высококвалифицированных рабочих и инженерных кадров.

Понимая важность химического образования в промышленном и экономическом развитии страны, правительство Вьетнама ввело в программу школьного обучения предмет «химия» с 8 класса и различные учебные мероприятия химической направленности (химические кружки, олимпиады, производственные экскурсии). Среди высших учебных заведений следует отметить Университет естественных наук - Вьетнамский национальный университет в г. Ханой, Хошиминский политехнический университет, Университет Кантхо, которые готовят ученых химиков различных направлений (Рис. 1). Большое внимание в стране уделяется последидипломному образованию, которое заключается в подготовке научных кадров высшей

квалификации в области химической науки, образования и технологии, а также развитию программ международного сотрудничества.

В состав Вьетнамской академии наук и технологий входят исследовательские институты, занимающиеся химическими проблемами (Институт химии, Вьетнамский институт промышленной химии, Институт лекарственных растений, Институт морской биохимии).



Рис. 1. Вьетнамский национальный университет в г. Ханой

Кроме того, в стране существует сеть Национальных ключевых лабораторий, сотрудники которых ведут химические исследования по основным научным направлениям. К этим направлениям относятся:

технологии производства удобрений, базовых химических соединений (кислоты, щелочи и др.); нефтехимия, переработка нефти и природного газа (НПЗ Дунг Куат, Нги Сон); производство полимеров, пластмасс, синтетических волокон; агрохимия (удобрения, пестициды, биологические средства защиты растений); производство фармацевтической продукции, в том числе из растительного сырья. Без специалистов в области химии и химического анализа не могут эффективно работать предприятия пищевой промышленности (пищевые добавки, технологии переработки и консервации продуктов), энергетики и водоснабжения, металлургические предприятия, аналитические лаборатории определения качества продукции (Рис. 2).

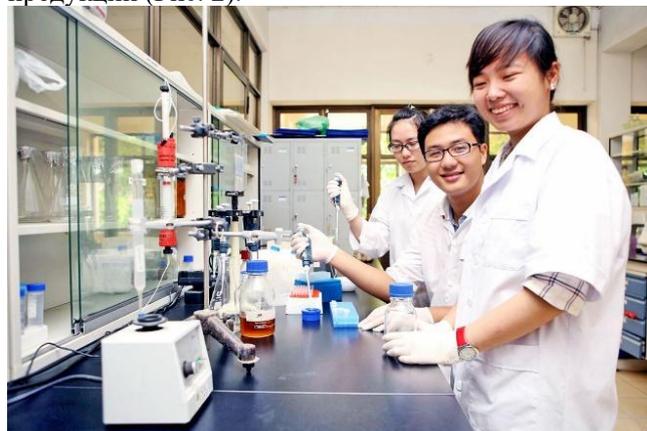


Рис. 2. Проведение химических исследований в университетских лабораториях Вьетнама

В октябре 2025 года во Вьетнаме вступил в силу закон «О науке, технологиях и инновациях», открывающий новую главу в процессе развития страны, основанного на знаниях [2].

Вьетнамская химическая промышленность стремится к устойчивому росту, внедряя инновации и укрепляя позиции на мировом рынке. Современная история развития химического образования и науки в Социалистической республике Вьетнам является ярким примером преодоления существенных препятствий на пути успешного социального и экономического развития страны путем развития и совершенствования образовательной политики.

*Данная публикация подготовлена по результатам работы студенческого научного кружка кафедры Физической и коллоидной химии РУДН имени П. Лумумбы*

#### **Список литературы**

1. Ле Ван Вьонг. К вопросу о становлении высшего образования во Вьетнаме // Юго-Восточная Азия: Актуальные проблемы развития. – 2018. – Т. II, № 4. - С. 144-152.
2. Phan L.H., Doan B.N. Higher education in market-oriented socialist Vietnam: New players, discourses, and practices // Palgrave Macmillan. – 2020. - 393 p.

УДК 667.61

Пигас А.В., Зверева О.В., Покровский С.Я.

## Эффективные методы нанесения порошковых лакокрасочных покрытий: сравнительный анализ и перспективы применения

Пигас Александр Валерьевич – студент;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры ЛогЭКИ;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье анализируются современные технологии и методы нанесения порошковых лакокрасочных покрытий (ЛКП), которые представляют собой малоотходные и экологически безопасные решения для защиты металлических и неметаллических поверхностей. Рассматриваются исторические аспекты развития порошковой окраски, отличия порошковых материалов от традиционных жидких ЛКМ, а также ключевые технологические процессы нанесения. Особое внимание уделено электростатическому, трибостатическому, газопламенному и электродуговому методам, а также их применению в различных отраслях промышленности. На основе анализа существующих технологий выявлены преимущества и ограничения каждого метода, а также определены условия оптимального выбора способа нанесения покрытий.*

*Ключевые слова:* Порошковые лакокрасочные покрытия; технология нанесения; электростатическое распыление; трибостатическое распыление; газопламенное напыление; электродуговое нанесение; полимерные композиции; промышленная защита.

## Effective methods of applying powder coatings: comparative analysis and application prospects

Pigas A.V. Zvereva O.V. Pokrovskiy S.Y.

D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology

*The article analyzes modern technologies and methods of applying powder coatings, which are low-waste and environmentally friendly solutions for the protection of metallic and non-metallic surfaces. The historical aspects of the development of powder coating, the differences between powder materials and traditional liquid coatings, as well as key technological processes of application are considered. Special attention is paid to electrostatic, tribostatic, flame and electric arc methods, as well as their application in various industries. Based on the analysis of existing technologies, the advantages and limitations of each method have been identified, as well as the conditions for the optimal choice of coating method.*

*Keywords:* Powder coatings; application technology; electrostatic spraying; tribostatic spraying; flame spraying; electric arc coating; polymer compositions; industrial protection.

### Введение

Производство и применение ЛКМ развивалось с доисторических времен, пройдя путь от искусства отдельных кустарей, эмпирического ремесла до современных, весьма сложных технологий, основанных на достижениях многих отраслей знаний.

Порошковая окраска представляет собой технологию формирования полимерных покрытий, которая начала активно применяться в 1950–1960-х годах. В настоящее время около 15% всех окрашиваемых изделий в мире обрабатываются порошковыми лакокрасочными материалами. Основное отличие порошковых ЛКП от традиционных жидких систем заключается в отсутствии органических растворителей, жидкого пленкообразователя и использовании исходного твердого состояния краски.

Современные жидкие ЛКМ обладают рядом ограничений, включая необходимость нанесения многослойного покрытия, обеспечение санитарно-пожарной безопасности и очистку производственных выбросов. Порошковые системы позволяют устранить эти недостатки, обеспечивая одновременно высокую производительность процесса, снижение негативного воздействия на окружающую среду и безопасность персонала [1, 2]. Рост производства

порошковых ЛКП на мировом рынке превышает динамику выпуска жидких ЛКМ, что обусловлено сочетанием технологических и экологических преимуществ.

### Основная часть

#### Общие характеристики порошковых ЛКП

Порошковые лакокрасочные покрытия представляют собой композиции, включающие полиэтилен, ПВХ, нейлон, фторид-содержащие пластмассы, эпоксидные, полиэфирные и акриловые смолы. Их высокая экологическая безопасность и низкий уровень отходов делают их привлекательными для применения в самых различных отраслях. Технологическая особенность порошковых систем заключается в том, что формирование покрытия осуществляется без использования растворителей, а нанесение и последующее отверждение создают прочный полимерный слой на поверхности изделия [2].

#### Методы нанесения порошковых ЛКП

Существуют четыре основных метода нанесения порошковых ЛКП: электростатическое и трибостатическое распыление, газопламенное и электродуговое напыление. Каждый из них имеет свои технологические особенности и сферу применения, что определяет эффективность

покрытия, равномерность распределения материала и качество адгезии.

#### Электростатическое распыление

Является наиболее популярным и универсальным методом. Порошковые частицы приобретают электрический заряд и притягиваются к

поверхности изделия под воздействием электростатического поля (рис. 1). Такой способ обеспечивает равномерное нанесение даже на труднодоступные элементы, а также подходит для обработки деталей различных размеров и конфигураций.

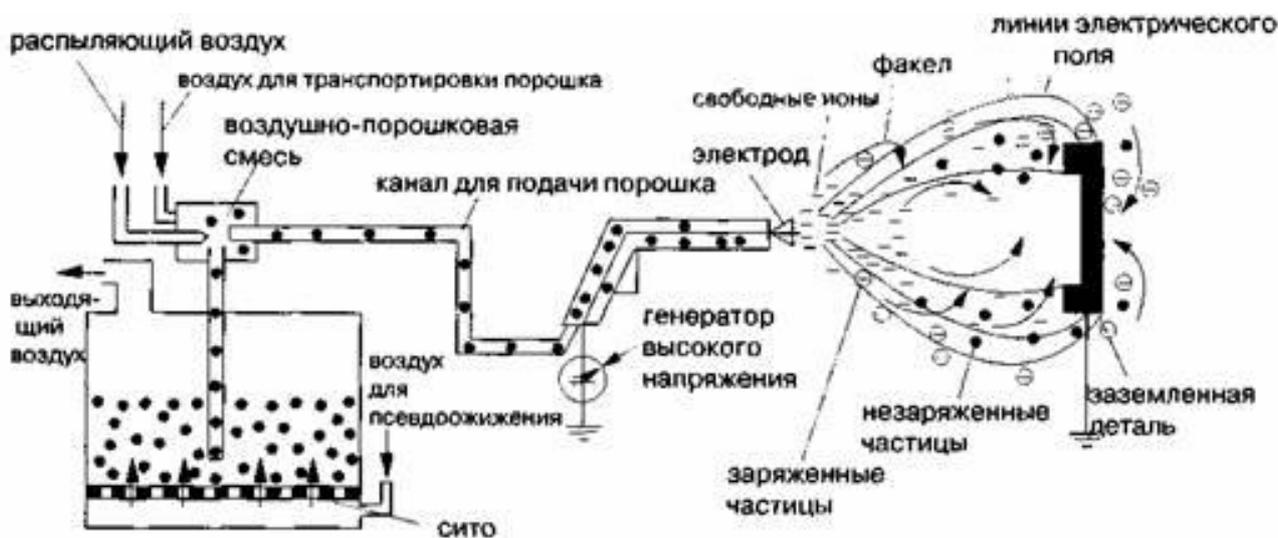


Рисунок 1 – Технологическая схема процесса электростатического нанесения порошковых ЛКП

Электростатическое распыление активно применяется в автомобилестроении, производстве бытовой техники и металлоконструкций для защиты от коррозии и создания декоративной отделки [1–3].

#### Трибостатическое распыление

основано на передаче заряда порошковому материалу за счёт трения в момент прохождения через форсунку. Этот метод позволяет эффективно покрывать мелкие детали сложной формы, что делает его востребованным в медицине, фармацевтике и микроэлектронике для защиты инструментов и компонентов от влаги, бактерий и химических воздействий [3].

#### Газопламенное нанесение

осуществляется с помощью газовой горелки, которая плавит порошок и формирует покрытие на поверхности изделия. Метод отличается высокой скоростью нанесения, экономичностью при обработке крупных объектов и относительно низкими временными затратами на отверждение. Применение газопламенного способа актуально в строительной отрасли, трубопрокатной промышленности и мебельном производстве [2].

#### Электродуговое нанесение

использует электрическую дугу для плавления порошка и формирования толстого защитного слоя. Метод подходит для крупных поверхностей, ремонта и восстановления изделий, а также для защиты оборудования в горнодобывающей и сталелитейной промышленности от абразивного износа и коррозии [2].

На практике оптимальным считается электростатическое нанесение порошковых ЛКП благодаря универсальности метода, высокой эффективности и экономичности процесса. Другие методы, включая нанесение в кипящем слое и

струйное напыление, применяются в специализированных областях и значительно реже [3].

#### Применение и свойства порошковых ЛКП

Выбор метода нанесения определяется конкретными требованиями к покрытию, характеристиками поверхности и эксплуатационными условиями. Порошковые покрытия обеспечивают высокую адгезию, устойчивость к коррозии и атмосферным воздействиям, а также декоративные качества. Используемые полимеры позволяют создавать покрытия с различными функциональными свойствами: термостойкость, химическую инертность и механическую прочность.

Постоянный рост мирового спроса на порошковые покрытия, в частности на полиуретановые системы, объясняется их экономической целесообразностью, экологической безопасностью и широкими возможностями применения в промышленности и строительстве [3, 4].

#### Заключение

Технология порошковой окраски является эффективным и экологически безопасным методом формирования полимерных покрытий. Развитие методов нанесения — электростатического, трибостатического, газопламенного и электродугового — позволяет обеспечить высокое качество покрытия, равномерность распределения материала и долгий срок службы. Среди рассмотренных методов оптимальным с точки зрения универсальности и экономичности является электростатическое распыление.

Порошковые ЛКП находят широкое применение в автомобилестроении, металлоконструкциях,

медицинской и фармацевтической промышленности, микроэлектронике и других сферах. Их использование позволяет снизить негативное воздействие на окружающую среду и улучшить эксплуатационные характеристики изделий. Современные полимерные системы и технологии нанесения обеспечивают стабильность покрытия и высокие декоративные и защитные свойства, что подтверждает перспективность дальнейшего развития отрасли [5-9].

#### Список использованных источников

1. Решетников В. Методы оценки качественных характеристик порошковых красок, актуальных при нанесении. // Промышленная окраска, 2013. – № 3. С. 20–23.

2. Формирование защитно-декоративного покрытия из порошковых красок на древесной подложке. Миронова С.И. СПбГЛТУ 2000.

3. Технологическо-организационный инжиниринг окрасочных производств. / В. С. Болдырева, Ю. М. Аверина, В. В. Меньшиков, С. В. Кузнецов, К. Ю. Колыбанов. 2020, том 54, № 3, с. 299–303

4. Меньшиков В.В., Рыбкин В.А. Концепция инновационных “пэйнт-технологий” и ее практическая реализация // Лакокрас. матер. их примен. 2016. № 5. С. 49.

5. Яковлев А. Д. Здор В. Ф., Каплан В. И. Порошковые полимерные материалы и покрытия на их основе. Л.: Химия, 1979. 256 с.

6. Языков С.Ю., Композиционные покрытия на основе порошковых красок с функционализирующими наполнителями, электростатически напыленные из смесей, обработанных в планетарной мельнице, ТПУ, Томск 2016. 150 с.

7. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В. Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 183-192. – DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.

8. Бизнес-моделирование реинжиниринга химико-технологических систем / Б. Б. Богомолов, Ю. М. Аверина, А. И. Верхососова, М. Е. Дюженко // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 2. – С. 20-25.

9. Системный анализ оценки степени экологической полноценности лакокрасочного материала при организации замкнутых систем водообеспечения производств / Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, А. И. Верхососова, Н. В. Гусева // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 1(280). – С. 121-122

УДК 631.8

Чередниченко В.А., Гасов Д.Ю., Чередниченко А.Г., Глинушкин А.П.

## **Синтез регуляторов роста растений на основе производных 1,2,3-бензотриазола и разработка новых препаративных форм на их основе**

Чередниченко Владимир Александрович, аспирант 4-го года обучения кафедры Физической и коллоидной химии факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва

Гасов Дмитрий Юрьевич, студент магистратуры кафедры Физической и коллоидной химии факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва

Чередниченко Александр Генрихович, д.х.н., заведующий кафедрой Физической и коллоидной химии факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва

Глинушкин А.П., д.с.-х.н., профессор кафедры Физической и коллоидной химии факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва

Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*Проведен синтез и исследование физико-химических свойств бис-мочевин с использованием 2,4-толулендиизоцианата и 1,2,3-бензотриазола. Реакцию проводили в среде дихлорметана при температуре 40 °С. В качестве катализатора использовали триэтиламин (ТЭА). Выделение целевого продукта проводили фильтрованием и его выход составлял 96-98 %. Для всех синтезированных продуктов была определена температура плавления и проведен тонкослойный хроматографический анализ, который показал отсутствие побочных продуктов в синтезированных соединениях. Идентификационный анализ полученных соединений проводили методом ИК-спектроскопии порошкообразных образцов с использованием метода полного искаженного внутреннего отражения (FTIR). На основе синтезированных биологически активных соединений были приготовлены жидкие микроэмульсионные препаративные формы с различным содержанием активного компонента. Формуляции были использованы в качестве протравителей семян ячменя перед посевом. Полученные результаты полевых испытаний подтвердили перспективность проведенных исследований для синтеза новых регуляторов роста растений.*

*Ключевые слова: агрохимия, регуляторы роста растений, производные бензотриазола, новые препаративные формы*

## **SYNTHESIS OF PLANT GROWTH REGULATORS BASED ON 1,2,3-BENZOTRIAZOLE DERIVATIVES AND DEVELOPMENT OF NEW FORMULATIONS BASED ON THEM**

Cherednichenko V.A., Gasov D.Yu., Cherednichenko A.G., Glinushkin A.P.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*The synthesis and investigation of the physico-chemical properties of bis-urea using 2,4-toluene diisocyanate and 1,2,3-benzotriazole were carried out. The reaction was carried out in a dichloromethane medium at a temperature of 40 °C. Triethylamine (TEA) was used as a catalyst. The target product was isolated by filtration and its yield was 96-98%. The melting point was determined for all synthesized products and a thin-layer chromatographic analysis was performed, which showed the absence of by-products in the synthesized compounds. Identification analysis of the obtained compounds was performed by IR spectroscopy of powdered samples using the method of total distorted internal reflection (FTIR). Liquid microemulsion formulations with different contents of the active component were prepared on the basis of synthesized biologically active compounds. The formulations were used as protectants for barley seeds before sowing. The obtained field test results confirmed the prospects of the conducted research for the synthesis of new plant growth regulators.*

*Keywords: agricultural chemistry, plant growth regulators, benzotriazole derivatives, new formulations*

### **Введение**

Эффективное ведение высокопродуктивного сельскохозяйственного производства сегодня невозможно без использования современных средств защиты и регуляторов роста растений [1]. Среди многочисленных производных мочевины известно много биологически активных соединений, оказывающих регуляторное действие на культурные

и сорные растения [2]. Для синтеза этих соединений часто используют известную реакцию ароматических изоцианатов и тиоизоцианатов с различными аминами. В промышленной практике синтеза полиуретановых полимеров используются различные ди- и полиизоцианаты, которые также могут быть использованы для получения новых биологически активных соединений, используемых в качестве

пестицидов. Ароматические диизоцианаты, благодаря наличию двух изоцианатных групп ( $-N=C=O$ ), связанных с ароматическим кольцом, обладают высокой реакционной способностью по отношению к нуклеофильным агентам и имеют большое практическое значение. В свою очередь, гетероциклические амины, содержащие атомы азота, кислорода и серы, играют важную роль в биохимии, поскольку они входят в состав природных биомолекул, лекарственных препаратов и ферментов [3]G. Изучение реакций ароматических диизоцианатов с производными гетероциклических аминов представляет научный интерес, поскольку позволяет получать новые соединения с разнообразной биологической активностью. Эти соединения могут иметь особое значение для современного сельского хозяйства, где высокая биологическая активность должна сочетаться с низкой токсичностью и экологической безопасностью [4-5].

### Экспериментальная часть

Целью данного исследования является изучение закономерностей взаимодействия ароматических диизоцианатов с различными гетероциклическими аминами, идентификация полученных продуктов, разработка новых препаративных форм на их основе и определение их биологической активности. Общий механизм рассматриваемых реакций предполагает осуществление нуклеофильного присоединения аминного компонента к карбонильным группам диизоцианата. Реакцию проводили в стеклянной колбе с плоским дном объемом 50 мл, установленной на магнитной мешалке, в среде дихлорметана при температуре  $40^{\circ}\text{C}$ . Для этого расчетное количество гетероциклического амина растворяли при перемешивании в дихлорметане. К полученному раствору добавляли расчетное количество 2,4-толуолдиизоцианата и триэтиламина (катализатора). Реакцию проводили в течение 8 часов до полного осаждения целевого продукта. Синтезированное вещество отфильтровывали на фильтре Шотта под вакуумом и сушили до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре  $70^{\circ}\text{C}$ . Полученную бисмочевину взвешивали для определения выхода и анализировали.

На основе синтезированных биологически активных соединений были приготовлены жидкие микроэмульсионные препаративные формы (Рис. 1 и Рис. 2).

### Обсуждение результатов

При использовании производных 2,4-толуолдиизоцианата и 1,2,3-бензотриазола выход конечных продуктов составлял 96-98 %. Для всех синтезированных продуктов была определена температура плавления и проведен тонкослойный хроматографический анализ, который показал отсутствие побочных продуктов в синтезированных соединениях. Идентификационный анализ полученной бис-мочевины проводили методом ИК-спектроскопии порошкообразных образцов с

использованием метода полного искаженного внутреннего отражения (FTIR).



Рис. 1. Новые препаративные формы регуляторов роста растений на основе синтезированных замещенных бис-мочевин



Рис. 2. Процесс обработки семян ячменя перед посевом новыми препаративными формами регуляторов роста растений

В состав концентратов микроэмульсий с различным содержанием действующего вещества были дополнительно введены соединения, обеспечивающие лучшие показатели смачиваемости обрабатываемой поверхности и трансмембранный перенос биологически активного компонента. Полученные препаративные формы использовались для обработки семян ячменя перед посевом (Рис. 2).

Полученные результаты полевых испытаний указывают на перспективность использования синтезированных бис-мочевин с использованием 1,2,3-бензотриазола и их препаративных форм в качестве эффективных агрохимических препаратов (Рис. 3).

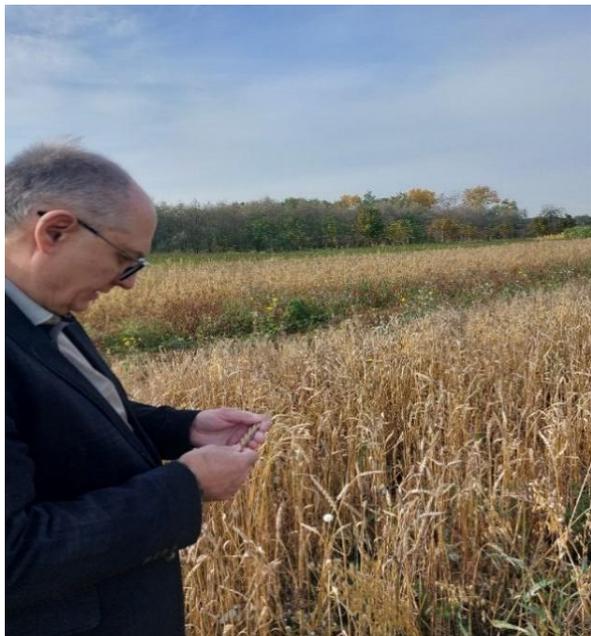


Рис. 3. Полевые испытания новых препаративных форм регуляторов роста растений на посевах ячменя

#### Заключение

Синтезированные с использованием 2,4-толуиленидиизоцианата и 1,2,3-бензотриазола бисмочевины и разработанные на их основе препаративные формы в виде концентрата микроэмульсий с различным содержанием действующего вещества были использованы в качестве протравителей семян ячменя. Проведенные

опытные полевые испытания подтвердили перспективность продолжения дальнейших исследований с целью поиска оптимальных структур регуляторов роста растений и их новых формуляций.

#### Список литературы

1. Мельников Н.Н. Пестициды. Химия, технология и применение. – М.: Химия. – 1987. – 712 с.
2. Мельников Н.Н., Новожилов К.В., Белан С.Р., Пылова Т.Н. Справочник по пестицидам. - М.: Химия. - 1985. - 352 с.
3. Kalinitchenko V.P., Glinushkin A.P., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N., Sukovatov V.A., Il'ina L.P., Makarenkov D.A. Chemical Soil-Biological Engineering Theoretical Foundations, Technical Means, and Technology for Safe Intrasoil Waste Recycling and Long-Term Higher Soil Productivity // ACS Omega. - 2020. – Vol.28. – P. 17553-17564.
4. Тарасов С.С., Михалев Е.В., Речкин А.И., Крутова Е.К. Регуляторы роста и развития растений: классификация, природа и механизм действия // Агрехимия – 2023. - № 9. - С. 65-80.
5. Mushtakov A.G., Markova E.B., Kurochkin A.V., Anistratov N.A., Zaytseva Y.M., Guseva E.A., Skvortsova L.G., Cherednichenko A.G., Glinushkin A.P. Extraction of heavy metal ions from aqueous solutions by frame sorbents based on benzene-1,3,5-tricarboxylate (MBTC) and benzene-1,4-dicarboxylates (MB DC) of various metals // Russian Agricultural Sciences. – 2024. - № 5 – P. 33-40.

УДК 339

Новикова Т.Д., Зверева О.В., Журавлева О.С.

**Customer journey натуральных добавок: стратегия продвижения натуральных пищевых добавок на основе анализа потребительского пути**

Новикова Таисия Дмитриевна – магистр 1-го года обучения; taia.novikova002@gmail.com;

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры ЛогЭКИ;

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры ЛогЭКИ;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Россия, Москва.

В данной статье рассматривается путь потребителя на рынке натуральных добавок и ключевые факторы, влияющие на выбор продукции осознанной аудиторией. Особое внимание уделено тому, как химико-технологические предприятия адаптируют свои разработки под эти запросы, сочетая технологическую оптимизацию и маркетинговые подходы. На примере добавки на основе тыквенного пектина и катионов меди показано, каким образом инновационные решения могут быть экологичными, экономически целесообразными и понятными для потребителя. Работа демонстрирует необходимость комплексного подхода к разработке и продвижению наукоёмких продуктов.

Ключевые слова: натуральные добавки, потребительский путь, осознанный потребитель, химико-технологические предприятия, пектин, катионы меди, экологичность производства, маркетинговая адаптация, инновационные технологии, технология переработки, продуктовая стратегия.

**Customer Journey of Natural Additives: A Promotion Strategy for Natural Food Additives Based on Consumer Path Analysis**

Novikova T.D., Zvereva O.V., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article examines the consumer journey in the market for natural additives and the key factors influencing product choice among conscious buyers. Special attention is given to how chemical-technology enterprises adapt their developments to these demands by combining technological optimization with marketing approaches. Using the example of an additive based on pumpkin pectin and copper cations, the study demonstrates how innovative solutions can be ecological, economically viable, and easy for consumers to understand. The work highlights the importance of an integrated approach to the development and promotion of high-tech products.

Key words: natural additives, customer journey, conscious consumer, chemical-technological enterprises, pectin, copper cations, production environmental friendliness, marketing adaptation, innovative technologies, processing technology, product strategy.

**Введение**

Спрос на натуральные добавки стремительно растёт, и потребители всё чаще выбирают продукты с прозрачным составом и доказанной безопасностью [1]. Осознанная аудитория внимательно изучает ингредиенты, ищет научные подтверждения эффективности и доверяет брендам, которые честно объясняют технологию производства. В таких условиях химико-технологическим предприятиям важно учитывать путь потребителя (Customer Journey), чтобы выстраивать коммуникацию не только вокруг состава, но и вокруг пользы, безопасности и технологической прозрачности. Подробное понимание этапов, на которых клиент ищет информацию, сравнивает продукты и оценивает доверие, повышает успешность вывода новых добавок на рынок. Особенно это актуально для научно-технологичных решений, созданных на основе природных компонентов, например пектиновых композиций.

Цель настоящей статьи — показать, как анализ пути потребителя (Customer Journey) помогает химико-технологическим предприятиям адаптировать разработку и продвижение натуральных добавок под растущие запросы осознанного рынка, повышая конкурентоспособность и эффективность вывода продуктов на рынок.

**Основная часть**

Кто такие «осознанные потребители» и как они принимают решения

Современные «осознанные» потребители характеризуются высокой степенью внимания к своему здоровью и стремлением минимизировать риски, связанные с синтетическими или агрессивными компонентами в продуктах питания и косметике. На рисунке 1 показано приблизительное соотношение приоритетов этой категории потребителей.



Рис. 1 Основные приоритеты «Осознанных потребителей»

Исследования показывают, что для них ключевыми факторами становятся:

- **Натуральность и безопасность ингредиентов** — отсутствие синтетических консервантов, токсичных добавок, ГМО.
- **Прозрачность производства** — доступность информации о сырье, технологии и источниках компонентов.
- **Научная доказательность эффективности** — публикации, тестирования, сертификаты.
- **Экологичность** — минимизация отходов, устойчивое производство, биоразлагаемая упаковка.
- **Простота и понятность коммуникации** — краткое, ясное объяснение пользы продукта.

Такие покупатели склонны тщательно изучать состав продуктов, читать этикетки и искать подтверждения отсутствия вредных добавок — это проявление информированности и сознательного подхода [2]. Источники информации для них разнообразны: это не только обычная реклама, но и соцсети, блоги, научно-популярные статьи и рекомендации специалистов (врачи, диетологи), а также маркировка на упаковке, органические сертификаты и прочие сигналы качества. При этом если продукт относится к научно-технологичным решениям — например, содержит инновационные натуральные добавки — такая аудитория особенно требовательна к прозрачности технологий, достоверности заявлений и понятному объяснению механизма действия. Без этого доверие сложно завоевать, даже если состав действительно натуральный и безопасный.

*Customer Journey потребителя натуральной пищевой добавки (рис. 2)*

*Осознание потребности потребителем (Awareness)*

Путь потребителя продуктов, включающих натуральные добавки начинается с этапа осознания потребности, который формируется под влиянием стремления к более «чистым» и безопасным продуктам. Осознанные потребители проявляют повышенный интерес к минимально обработанным ингредиентам и натуральным альтернативам синтетическим компонентам. Согласно исследованиям, большинство покупателей связывает «натуральность» со здоровьем, простым составом и отсутствием искусственных добавок. Кроме того, важную роль для таких клиентов

играет желание внести экологический вклад и быть причастными к созданию здорового будущего. Ключевыми триггерами здесь выступают: забота о здоровье, снижение доверия к синтетическим консервантам, а также общий тренд на экологичное потребление. Эти факторы задают направление дальнейшего поведения клиента и делают натуральные добавки привлекательным сегментом рынка.

*Исследование, сравнение и значение прозрачности технологии (Consideration)*

После формирования потребности потребители переходят к этапу исследования и сравнения, уделяя внимание составу продукта, репутации бренда, маркировке, упаковке, отзывам и научным подтверждениям безопасности. Работы по исследованию феномена «clean label» демонстрируют, что понятный и короткий список ингредиентов существенно повышает доверие и вероятность покупки [3].

Особое значение приобретает прозрачность технологии производства: предприятия должны четко объяснять происхождение ингредиентов, методы обработки и доказательства безопасности. Это особенно важно, поскольку потребители зачастую по-разному интерпретируют термин «натуральный» и связывают его со здоровьем. Демонстрация технологической честности, снижение неопределённости и отсутствие сложных «химических» терминов повышают уровень доверия к продукту и влияют на итоговое решение о покупке.

*Выбор и покупка (Purchase)*

На этапе выбора и покупки ключевыми факторами являются прозрачность информации о составе, технологическом происхождении и безопасности натуральной добавки. Потребители ожидают понятных объяснений научных характеристик продукта, что снижает восприятие риска и повышает уровень доверия. Важную роль играют точки касания — упаковка, сайт предприятия, социальные сети, экспертные публикации и отзывы — которые помогают покупателю сравнить альтернативы и сформировать уверенность в выборе. Доступная коммуникация технологических особенностей продукта становится значимым конкурентным преимуществом.



Рис. 2 Схема потребительского пути в сегменте натуральных пищевых добавок

*Опыт использования (Usage)*

После покупки пользователь оценивает эффективность и удобство применения добавки. Если свойства продукта соответствуют заявленным — например, натуральный компонент действительно безопасен, не вызывает побочных эффектов и обеспечивает ожидаемый функциональный эффект — это подтверждает правильность решения о покупке. Положительный опыт снижает когнитивный диссонанс и формирует удовлетворённость, которая является основой для повторного выбора [4].

*Лояльность и рекомендации (Loyalty)*

Формирование лояльности начинается тогда, когда бренд поддерживает честную и прозрачную коммуникацию после покупки. Для рынка натуральных добавок критично, чтобы производитель продолжал делиться научной, но доступной информацией, демонстрировал экологичность и открытость производства и активно работал с обратной связью [5]. Такой подход усиливает доверие и стимулирует повторные покупки, а также рекомендации, особенно в сегментах, где важны безопасность и экологичность — например, косметика и фармацевтика.

*Как химико-технологические предприятия адаптируют продукт под запросы рынка*

*Разработка продукта с учётом потребностей*

При формировании продуктовой матрицы технологические подразделения опираются на аналитические данные о предпочтениях потребителя (clean-label, минимум «неузнаваемых» ингредиентов, функциональные преимущества) и трансформируют эти требования в технические задания для НИОКР [12]. В практической плоскости это означает выбор сырья, которое одновременно удовлетворяет технологическим критериям (стабильность, совместимость с матрицей продукта) и маркетинговым ожиданиям (натуральность, «короткий» состав). Примером служит разработка текстураторов и волокон из кожуры цитрусовых компанией Ingredion — решение позиционируется как «clean-label» и одновременно решает технологические задачи по текстуре и удержанию влаги

*Прозрачность технологии*

Для осознанной аудитории важно не только наличие «натурального» ярлыка, но и объяснение механизма действия ингредиента: как и почему он обеспечивает длительность хранения, стабилизацию или биологическую активность. Производители разрабатывают коммуникационные материалы научно-популярного формата, данные о тестах стабильности и безопасности, а также «лайт»-версии научных описаний для упаковки и сайта. Компания IFF (включая бывшая DuPont Nutrition & Biosciences) явно

продвигает подход «label-friendly» с акцентом на объяснение свойств ингредиентов и предоставление регуляторной и технологической поддержки клиентам [7].

*Экологичность и устойчивость производства*

Переход к натуральным решениям тесно связан с практиками устойчивого использования сырья (апсайклинг побочных потоков, ответственная заготовка растений, снижение энергозатрат). Примеры локальных инициатив и сертифицированных ферм показывают, что экологическая повестка становится частью производственной стратегии и маркетинга, усиливая конкурентное преимущество. Российская косметическая компания *Natura Siberica* декларирует сертифицированный отбор дикорастущих растений и соблюдение эко-стандартов в цепочке поставок. Благодаря ориентированности на натуральные ингредиенты из сибирских растений, сертифицированной органике и экологическим стандартам, *Natura Siberica* смогла закрепиться как один из лидеров российского рынка — её продукция продаётся не только в розницу внутри России, но и активно экспортируется [8]. В 2023–2024 гг. компания заявила о планах увеличить долю экспорта до 30 % выручки, выходя на новые международные рынки, что свидетельствует: спрос на «чистую», органическую и сертифицированную косметику сохраняется и стабильно растёт.

*Соответствие регуляторным требованиям*

Верификация безопасности и соответствие региональной регуляторике (сертификаты, протоколы испытаний, GMP, ISO и т. п.) играют значимую роль в формировании доверия. Для B2B-клиентов наличие испытаний, токсикологических оценок и сертификаций часто является обязательным условием покупки, а для конечного потребителя — фактором доверия, который отражается на упаковке и в коммуникации продукта. Дополнительным механизмом повышения доверия служат сторонние научные публикации и отраслевые отчёты о безопасности и эффективности.

В качестве удачного примера можно рассмотреть разработку добавки, в основе которой — пектин, извлечённый из тыквенного жмыха, и соединения меди. Выбор тыквенного жмыха как сырья позволил значительно снизить себестоимость — по сравнению с традиционными источниками пектина — за счёт утилизации побочного растительного сырья. При этом такой подход соответствует принципам устойчивого и экологичного производства, что делает продукт более привлекательным для «осознанного» потребителя [9].

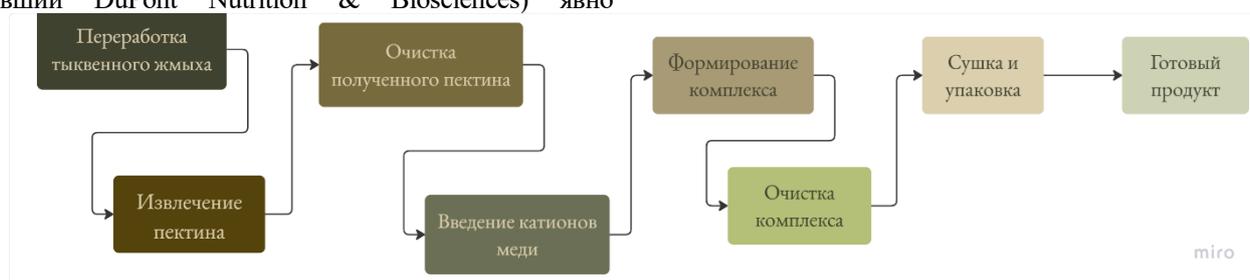


Рис. 3 Упрощенная блок-схема технологии получения добавки из тыквенного жмыха и катионов меди

Методика получения пектина из нетрадиционного растительного сырья подтверждается исследованиями, в которых пектины, выделенные из сельскохозяйственных отходов, характеризовались физико-химическими свойствами, пригодными для дальнейшего использования в пищевых, косметических или фармацевтических продуктах [10]. Далее пектин подвергся комплексованию с медью — согласно подходу, описанному в диссертации Э.И. Мамедова, что придаёт полученной матрице антимикробные свойства [11]. Конечный продукт при этом сочетает натуральную основу и востребованную функциональность. Такая комбинация отвечает ожиданиям осознанного рынка: пектин воспринимается как безопасный природный компонент, а медь обеспечивает антимикробный эффект. Исследования пектин-металлических комплексов подтверждают их биосовместимость и отсутствие токсичности при умеренных концентрациях. Основными направлениями применения такой добавки могут стать продукты длительного хранения, детское питание, эко- и био-косметика, а также фармацевтические формы с контролируемым высвобождением. Широкий спектр использования усиливает её коммерческий потенциал.

При коммуникации технологии важно упростить описание: «натуральный пектин из переработанной тыквы + безопасная медь = защита от микроорганизмов и более долгий срок хранения» — это понятно потребителю и удобно для маркировки. На рисунке 3 приведен пример упрощенной схемы производства добавки, которая может быть использована при коммуникации с покупателем.

В результате анализа и разработки был сделан вывод: при правильной технологической и маркетинговой стратегии такая добавка имеет хорошие шансы быть востребованной, приносить ценность и быть коммерчески жизнеспособной.

### Заключение

В условиях роста осознанного потребления химико-технологические предприятия вынуждены учитывать не только функциональные свойства добавок, но и полный путь потребителя — от поиска информации до оценки безопасности и экологичности продукта. Анализ показал, что натуральные ингредиенты, прозрачность производства и доказанная эффективность становятся ключевыми критериями выбора. Рассмотренный кейс добавки на основе тыквенного пектина и катионов меди демонстрирует, что технологические решения могут успешно адаптироваться под запросы рынка через оптимизацию сырья, повышение устойчивости производства и ясную коммуникацию пользы. Такой подход усиливает коммерческий потенциал продукта и снижает барьеры восприятия среди потребителей. Таким образом, интеграция маркетинговых и технологических

стратегий позволяет предприятиям эффективно выводить инновационные натуральные добавки на рынок.

### Список литературы

1. Куренков С.А. Потребительские предпочтения на рынке сгущенного молока: влияние сахарозаменителей, упаковки и цены // Молочнохозяйственный вестник. - 2025. - №3 (59). - С. 195-207.
2. Аннаев Х., Мередов М., Овезмухаммедов М. Экономика устойчивого потребления: как минимализм и осознанное потребление влияют на рынки // Инновационная наука. - 2024. - №10-2. - С. 50-51.
3. Фридеманн Н. Рецептуры clean-label: текущие запросы потребителей, новые концепции продуктов // Мясные технологии. - 2017. - № 8 (176). - С. 20-21.
4. Sharko E.R., Sokolova A.A. Factors of consumer trust in private label food products: a case of loyalty to russian retailers // Journal of applied economic research. - 2025. - №1. - P. 344-378.
5. Фролов Е.Б., Крюков В.В., Тимофеев Д.Е., Крюков А.В. "Прозрачность" производства: зачем она нужна и как ее обеспечить средствами еври мес-систем? // Главный механик. - 2010. - №1. - С. 18-26.
6. Ingredient Brings Clean Label Texturizers Made From Citrus Peels To The U.S. // ingredient.com URL: <https://www.ingredient.com/na/en-us/news-events/news/ingredient-brings-clean-label-texturizers-made-from-citrus-peels-to-the-us?.com> (дата обращения: 27.11.2025).
7. Clean Label: Beyond a Trend // Food & Beverage URL: <https://www.iff.com/food-beverage/clean-label-solutions/.com> (дата обращения: 27.11.2025).
8. Natura Siberica was graduated by two awards in this year! // Natura Siberica URL: <https://naturasiberica.ee/en/natura-siberica-was-graduated-by-two-awards-in-this-year/> (дата обращения: 27.11).
9. Новикова Т.Д., Криворотова С.А., Зверева О.В. Современное состояние рынка детского питания в России // Успехи в химии и химической технологии. - 2024. - №12. - С. 118-121.
10. Хайтметова С.Б., Тураев А.С., Мухитдинов Б.И., Халилова Г.А. Выделение и физико-химические характеристики пектина из нетрадиционного природного сырья // Химия растительного сырья. - 2021. - №4. - С. 75-82.
11. Мамедов Э.И. Разработка металлсодержащих композиционных материалов на основе пектинов различной природы: автореф. дис. канд. техн. наук: 1.5.6. - М., 2024. - 23 с.
12. Критерии оценки инновационного проекта в химической промышленности / А. М. Ефимова, С. А. Рублева, О. В. Зверева, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. - 2025. - Т. 39, № 1(292). - С. 18-20.

УДК 628.3

Гусева Н.В., Зверева О.В., Рублева С.А., Разводов А.В.

### **К вопросу разработки замкнутых систем водоснабжения для малотоннажных химических производств**

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики, zvereva.o.v@muctr.ru;

Рублева Софья Алексеевна – преподаватель кафедры логистики и экономической информатики;

Гусева Наталья Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики;

Разводов А.В – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики,

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*Статья посвящена исследованию методологических основ, практических проблем и перспектив развития замкнутых систем водоснабжения (ЗСВ) для промышленных предприятий. Рассматривается методика прогнозирования их развития через систему взаимосвязанных показателей водопользования. Подробно изложен методологический подход к расчету объемов воды в ЗСВ, основанный на дифференциации систем оборотного водоснабжения. В статье проанализированы ключевые технологические принципы создания бессточных систем, включая концентрирование стоков, регенерацию растворов и утилизацию ценных компонентов. Особое внимание уделено проблеме обработки высокоминерализованных продувочных вод и рассолов, а также экологическим рискам, связанным с их размещением.*

**Ключевые слова:** бессточные системы, оборотное и повторное водоснабжение, промышленное водопотребление, прогнозирование водопользования, химическая промышленность, обработка высококонцентрированных стоков, рекуперация ресурсов, экологическая безопасность, водооборотный цикл,

### **On the Development of Closed Water Supply Systems for Low-Capacity Chemical Production Plants**

Zvereva O.V., Guseva N.V., Rubleva S.A., Razvodov A.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

*The article is devoted to the study of methodological foundations, practical problems, and prospects for the development of closed water supply systems (CWSS) for industrial enterprises. A methodology for forecasting their development through a system of interrelated water use indicators is considered. A methodological approach to calculating water volumes in CWSS, based on the differentiation of water recirculation systems, is described in detail. The article analyzes the key technological principles for creating zero-discharge systems, including effluent concentration, solution regeneration, and recovery of valuable components. Special attention is paid to the problem of treating highly mineralized blowdown waters and brines, as well as the environmental risks associated with their disposal.*

**Keywords:** zero-discharge systems, water recirculation and reuse, industrial water consumption, water use forecasting, chemical industry, treatment of highly concentrated effluents, resource recovery, environmental safety, water circulation cycle.

#### **Введение**

Актуальность разработки замкнутых систем водоснабжения (ЗСВ) для промышленности обусловлена возрастающим дефицитом водных ресурсов и ужесточением экологических требований [2-5]. Переход к циркуляционным системам водопользования представляет собой стратегическое направление в области устойчивого развития промышленного производства, позволяющее одновременно решать задачи ресурсосбережения водных объектов и минимизировать антропогенное воздействие на окружающую среду. В статье рассматриваются методологические основы и практические проблемы внедрения ЗСВ с акцентом на прогнозирование их развития и анализ технологических решений [5-8].

#### **Основное содержание**

Первая система замкнутого цикла в России была реализована в 1973 году на Верх-Исетском

металлургическом заводе (Свердловск). В 1980-е годы наблюдалась устойчивая тенденция сокращения промышленного водопотребления при одновременном росте производственных мощностей. Достижение такого эффекта стало возможным благодаря активному внедрению систем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения, мощности которых за десятилетие увеличились на 30%. К 1990 году в СССР функционировало более 350 ЗСВ на различных промышленных предприятиях и в производственных комплексах.

Для предприятий химической промышленности переход на замкнутые схемы водопользования сопряжен с необходимостью применения более сложных и дорогостоящих методов очистки, что требует значительных материальных и финансовых вложений [8-14]. В этой связи особую важность приобретает прогнозирование развития ЗСВ и оценка связанных с этим затрат. Мощность

ЗСВ характеризуется объемом воды, циркулирующей в системе. Прогнозирование развития методов очистки сточных вод и замкнутых систем в химической промышленности осуществляется на основе комплекса взаимосвязанных показателей: валового водопотребления, объемов оборотно-повторного водоснабжения, потребления свежей воды, валового водоотведения и сброса сточных вод. Для расчетов используются фактические данные базового периода и текущие пятилетние показатели.

*Методология расчета объемов воды в ЗСВ [1].*

1. Определение разности между объемами оборотно-повторного водоснабжения и объемами в ЗСВ. Ограничивающие условия, следующие:

$$V_{\text{зам}} \leq V_{\text{об}} \leq V_{\text{во}},$$

$$V_{\text{сб}} + V_{\text{об}} = V_{\text{во}},$$

где  $V_{\text{зам}}$  – объемы воды, возвращаемые в замкнутые системы,

$V_{\text{об}}$  – объемы воды, находившиеся в оборотно-повторных системах,

$V_{\text{во}}$  – объемы валового водоотведения,

$V_{\text{сб}}$  – объемы сбрасываемых сточных вод.

2. Расчет максимальной доли объемов, отводимых в традиционные системы оборотно-повторного водоснабжения до перехода на замкнутую систему. Объемы, возвращаемые в замкнутые системы, можно представить как сумму объемов, возвращаемых в «традиционные» ( $V_{\text{т об}}$ ) и «сверхтрадиционные» ( $V_{\text{с об}}$ ) оборотно-повторные системы:

$$V_{\text{зам}} = V_{\text{т об}} + V_{\text{с об}}.$$

3. Разность объемов оборотно-повторного водоснабжения и объемов, находящихся в замкнутых системах ( $V_1$ ):

$$V_1 = V_{\text{об}} - V_{\text{зам}}.$$

Эта разность соответствует объему воды, возвращаемой в «традиционные» системы оборотно-повторного водоснабжения, и характеризует достигнутый уровень развития этих систем на предприятиях отрасли, за исключением тех, где уже реализованы замкнутые системы водного хозяйства.

4. Максимальная доля объемов ( $\delta_{\text{max}}$ ), отводимых в «традиционные» оборотно-повторные системы, в объемах валового водоотведения для каждого конкретного вида промышленности на определенном этапе является постоянной. Поэтому на следующем этапе работы находят максимальное значение этой доли. Это позволит определить ту часть объемов воды  $V_2$ , которая находится в «традиционных» системах оборотно-повторного водоснабжения водного хозяйства предприятий, работающих по замкнутым схемам

$$V_2 = \delta_{\text{max}} V_{\text{зам}}.$$

$$V_{\text{т об}} = V_1 + V_2$$

$$V_{\text{зам}} = V_{\text{т об}} (1 - \delta_{\text{max}})$$

В настоящее время водооборотные системы внедрены на 90% предприятий отрасли, однако это далеко не замкнутый цикл. Ниже приведены

принципы разработки бессточных и оборотных систем водоснабжения промышленных предприятий.

1. Принципы размещения предприятий и нормирования для схем комплексного использования водных ресурсов применяются укрупненные нормы водопотребления и водоотведения. Выбор местоположения новых производств требует проведения технико-экономических расчетов, учитывающих как доступность сырья, так и водных ресурсов. Особое внимание уделяется минимизации воздействия на водные объекты.

2. При создании технологии полностью замкнутых циклов водооборота очистки и рекуперации

ключевыми направлениями являются:

- концентрирование рассолов методами электродиализа, мембранного фильтрования и выпарки;
- регенерация растворов электролитов в гальванических производствах;
- утилизация ценных компонентов из сточных вод;
- использование доочищенных ливневых стоков.

3. Даже наиболее чистый цикл охлаждения со временем приводит к изменению качества воды из-за испарения. Возрастает общее солесодержание, концентрация сульфатов, хлоридов и ионов кальция, что усиливает способность воды вызывать отложения (накипь). Использование методов подкисления для борьбы с отложениями, в свою очередь, может увеличивать солесодержание и провоцировать коррозию оборудования. В результате вода становится непригодной для дальнейшего использования, и возникает необходимость либо сбрасывать продувочную воду, либо направлять ее на очистные сооружения. Сброс

высокоминерализованной воды в водоем наносит значительный экологический ущерб, сводя на нет экологическую целесообразность оборотной системы. В этом случае разработка бессточной системы требует обессоливания воды на специальных установках с последующим возвратом ее в цикл. Однако это увеличивает стоимость системы и порождает проблему утилизации образующихся рассолов.

4. Методы обработки высококонцентрированных стоков включают:

- Организацию прудов-накопителей: Этот метод приводит к загрязнению воздушной среды летом, требует создания зон санитарной защиты и несет риск загрязнения подземных вод. Аварии на дамбах таких прудов потенциально опасны для близлежащих водоемов.

- Закачивание в подземные горизонты: Этот способ может привести к загрязнению водоносных пластов, делая их непригодными для дальнейшего использования.

- Выпаривание: является экологически наиболее целесообразным, но и наиболее энергоемким процессом. Образующиеся твердые смеси солей, как правило, не находят

промышленного применения и при складировании могут загрязнять земельные участки, а также поверхностные и подземные воды.

Наиболее целесообразный путь разработки бессточных систем — создание таких технологических условий, при которых в процессе очистки воды можно получать компоненты, пригодные для использования в промышленной технологии, либо инертные твердые вещества, которые не растворяются и не загрязняют окружающую среду [15].

#### Заключение

Наиболее перспективным направлением развития бессточных систем является создание технологий, позволяющих извлекать из сточных вод компоненты для повторного использования в производстве или переводить отходы в инертные твердые формы. Современные подходы к проектированию ЗСВ должны интегрировать решения по очистке воды, рекуперации ресурсов и утилизации отходов, обеспечивая как экономическую эффективность, так и экологическую безопасность промышленного производства. Дальнейшие исследования целесообразно направить на совершенствование методов прогнозирования развития ЗСВ и разработку энергоэффективных технологий обработки высококонцентрированных стоков.

#### Список литературы

1. Комиссаров Ю.А., Гордеев Л.С., Нгуен С.Н. Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств. М.: Химия, 2002. — 496 с.
2. Технология безреагентного обезжелезивания артезианской воды для нужд оборотного водоснабжения металлургических предприятий / Е. Н. Кузин, Ю. М. Аверина, А. Ю. Курбатов, П. А. Сахаров // Черные металлы. — 2020. — № 10. — С. 66-71.
3. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В. Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. — 2021. — Т. 22, № 4. — С. 183-192. — DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.
4. Development and design of a closed water use cycle / J. M. Averina, G. E. Kaliakina, D. Y. Zhukov [et al.] // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 : Conference proceedings, Albena, 30 июня – 06 2019 года. Vol. 19. — Albena: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2019. — P. 145-152. — DOI 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019.
5. Development of Nanofiltration Ceramic Membrane Production Technology / Y. M. Averina, A. Y. Kurbatov, D. A. Sakharov, E. N. Subcheva // Glass and

Ceramics. — 2020. — Vol. 77, No. 3-4. — P. 98-102. — DOI 10.1007/s10717-020-00248-x

6. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки / Ю. М. Аверина, Н. А. Моисеева, Д. А. Шувалов [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. — 2018. — Т. 32, № 14(210). — С. 17-19.
7. Ахметова, В. Н. Контроллинг на малых инновационных предприятиях / В. Н. Ахметова, Е. А. Барабанщикова, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. — 2017. — Т. 31, № 15(196). — С. 76-77.
8. Аверина, Ю. М. Комплексный подход к проблеме обезжелезивания воды / Ю. М. Аверина, Д. В. Павлов, С. О. Вараксин // Водоочистка. — 2010. — № 12. — С. 23-26.
9. Аверина, Ю. М. Обезжелезивание воды с замкнутым циклом водопользования / Ю. М. Аверина, Д. В. Павлов, С. О. Вараксин // Вода: химия и экология. — 2011. — № 2(32). — С. 18-22.
10. Верховосова, А. И. Основные направления применения химических технологий в строительной отрасли / А. И. Верховосова, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. — 2024. — Т. 38, № 12(291). — С. 99-101.
11. Композиционные материалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Е. Н. Субчева, Ю. М. Аверина, Е. В. Юртов, О. В. Зверева. — Москва : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2017. — 128 с.
12. Осипов, Г. А. Актуальные проблемы обращения с отходами в Российской Федерации / Г. А. Осипов, Ю. М. Аверина, А. С. Куценко // Успехи в химии и химической технологии. — 2023. — Т. 37, № 4(266). — С. 158-164.
13. Критерии оценки инновационного проекта в химической промышленности / А. М. Ефимова, С. А. Рублева, О. В. Зверева, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. — 2025. — Т. 39, № 1(292). — С. 18-20.
14. Наиболее успешные коммерциализированные технологии в области очистки воды / Ю. М. Аверина, О. В. Зверева, С. А. Рублева [и др.] // Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики страны» — Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2024. — С. 84-87.
15. Проскуракова Л. Н., Саритас О., Сиваев С. Б. Водохозяйственный комплекс: глобальные вызовы и долгосрочные тенденции инновационного развития / Л. Н. Проскуракова, О. Саритас, С. Б. Сиваев; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». — М.: НИУ ВШЭ, 2015. — 84 стр.

УДК 338.45

Трошкова А.П., Копылова Л.Е., Журавлева О.С.

### **Системный технологический скаутинг как инструмент повышения эффективности инновационного развития промышленных компаний в условиях трансформации**

Трошкова Анна Павловна – студентка группы МТ-18, кафедры менеджмента и маркетинга.

Копылова Лариса Евгеньевна – доцент кафедры менеджмента и маркетинга.

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики. ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрена проблема системности и эффективности инновационного развития промышленных компаний, в частности, в условиях высокой турбулентности и динамичных изменений в нефтегазовом секторе. Проведен анализ существующих теоретических и методологических подходов к технологическому скаутингу, его роли и функций в управлении инновациями и была предложена комплексная схема системы технологического скаутинга.*

*Ключевые слова: технологический скаутинг, инновации, нефтегазовый сектор.*

### **Systemic technological scouting as a tool for improving the efficiency of innovative development in industrial companies during the transformation process**

Troshkova A.P., Kopylova L.E., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article addresses the problem of systematicity and effectiveness in the development of industrial companies, particularly under conditions of high turbulence and dynamic changes in the oil and gas sector. An analysis of existing theoretical and methodological approaches to technology scouting, its role, and functions in innovation management has been conducted and functions in innovation management has been conducted.*

*Key words: technology scouting, innovation, oil and gas sectors.*

#### **Введение**

Современная промышленность характеризуется беспрецедентной скоростью технологических изменений. Одной из ключевых предпосылок этого процесса является развитие цифровых продуктов и технологий, таких как мобильный интернет, искусственный интеллект, Big Data, облачные технологии, роботы нового поколения, виртуальная и дополненная реальность, интернет вещей, блокчейн и др. [1].

В настоящее время для сохранения и усиления своих позиций на рынке недостаточно лишь совершенствовать существующие технологии — необходимо систематически находить, оценивать и внедрять инновационные решения извне. В этом может помочь скаутинг технологий (от англ. *scout* — «разведчик») — процесс систематического поиска и анализа технологических решений различного уровня готовности с целью формирования ключевых направлений развития, инжиниринга технологий или приобретения решений на рынке. Такие решения могут применяться для устранения актуальных производственных проблем, оптимизации затрат, повышения уровня безопасности, создания новых продуктов или освоения узких рыночных ниш [2].

Нефтегазовый сектор, характеризующийся высокими капитальными затратами, сложными производственными процессами, строгими экологическими требованиями и необходимостью снижения углеродного следа, является одной из наиболее требовательных и в то же время нуждающихся в инновациях отраслей. Компании данного сектора постоянно ищут способы повышения

эффективности разведки и добычи, совершенствования процессов переработки, освоения трудноизвлекаемых запасов, развития альтернативных источников энергии и цифровизации всех бизнес-процессов. Для поддержания конкурентоспособности и устойчивого развития компаниям необходимо выстроить комплексную и результативную систему поиска и интеграции новых технологий во внутренний контур.

#### **Теоретические аспекты понятия «технологический скаутинг»**

Термин «технологический скаутинг» не имеет единого общепринятого определения в академической литературе, однако различные авторы сходятся во мнении относительно его основной сущности — это поиск и верификация решений в области технологий и бизнес-процессов. Данный метод использует инструменты анализа патентов, научной литературы, отраслевых выставок и других источников технической информации с целью определения того, кто, где, почему и каким образом разрабатывает или использует передовые инновационные технологии.

Невозможно представить технологическую разведку без глубокого анализа технологий, поскольку именно анализ лежит в основе формирования эффективной конкурентной стратегии. Данный процесс можно рассматривать как предвидение технологических сдвигов, являющееся неотъемлемой составляющей стратегического видения компании (форсайта) [3, 4].

С появлением концепции открытых инноваций, предложенной Генри Чесбро, произошло

существенное развитие в сфере исследований и разработок (research and development, R&D). Традиционная модель, ориентированная на использование исключительно внутренних ресурсов и разработку инноваций силами самой компании, уступила место подходу, активно задействующему внешние источники знаний и предполагающему сотрудничество с внешними агентами в процессе создания инноваций [5]. Из этого следует, что значимые идеи и технологические прорывы нередко возникают за пределами отдельной организации, а предприятия могут получать конкурентные преимущества, используя внешние знания посредством целенаправленного взаимодействия. В этой связи компании все чаще обращаются к внешним поставщикам технологий (в том числе международным провайдером), стремясь ускорить внедрение передовых инноваций вместо формирования собственных решений «с нуля». Следует отметить, что технологический скаутинг может быть направлен не только на поиск готовых решений, но и на сбор данных о конкурентных технологиях для последующей разработки собственных аналогичных решений.

Основная трудность технологического скаутинга заключается в необходимости отслеживания новейших технологий, что предполагает систематический процесс поиска, мониторинга и анализа актуальных технологических разработок и трендов с целью своевременного выявления инноваций, способных оказать влияние на деятельность компании или отрасли в целом. Данный процесс включает сбор информации из различных источников, оценку потенциала технологий и прогнозирование их влияния на бизнес, что способствует принятию обоснованных решений о внедрении цифровых технологий и поддержании конкурентоспособности.

#### **Стратегии развития и ускорения инноваций в промышленности**

В стремлении к инновациям организации неизбежно сталкиваются с двумя ключевыми дилеммами: насколько точно идентифицированы перспективные направления развития и насколько эффективно реализуются выбранные стратегии.

В то время как инновационные стратегии часто акцентируют внимание на быстром генерировании идей и строгом контроле над проектами для их последующей реализации, они нередко упускают аспект рыночной востребованности. Компании зачастую затрачивают значительные ресурсы на разработку продуктов или услуг, которые в итоге не становятся значимыми или успешными, поскольку игнорируют ключевой этап — глубокий анализ рынка и выявление реальных потребностей клиентов. Вместо концентрации исключительно на идеях организациям необходимо смещать фокус на сбор и анализ данных, чтобы убедиться, что разрабатываемые решения направлены на задачи, действительно важные для потребителей и за решение которых рынок готов платить.

Сущность инноваций заключается в продуктивном использовании информации. Идеи являются следствием осознания конкретной проблемы и наличия соответствующих технологических возможностей для её решения. Существенным недостатком многих существующих моделей инновационного развития является их неспособность в полной мере признать фундаментальную роль информации. Частично это обусловлено широким распространением и влиянием системы управления проектами *Stage-Gate*, разработанной Бобом Купером, которая, несмотря на свою эффективность в сопровождении проектов от концепции до вывода продукта на рынок, не всегда уделяет должное внимание информационной базе и рыночным потребностям [6]. Данная структурированная система, безусловно, повысила успешность организаций при запуске новых предложений, однако её логика, ориентированная на управление уже сформированными проектами, недостаточно применима на ранних этапах зарождения и планирования инноваций.

По своей сути любая идея представляет собой новое сочетание уже известных фактов. Если такое сочетание является оригинальным, оно может привести к творческому прорыву. Источниками подобных комбинаций выступают научные открытия, технологические новшества и анализ рыночных данных, отражающих ожидания и поведение потребителей. Именно такие идеи лежат в основе подлинных инноваций, позволяя создавать принципиально новые продукты и услуги. В процессе разработки продукта идея выполняет роль связующего звена между выявленной проблемой или потребностью и соответствующим технологическим решением, при этом её ценность напрямую зависит от качества исходной информации. В связи с этим для развития инновационной деятельности крайне важно уделять внимание систематическому сбору и анализу ключевых данных, включая изучение изменяющихся запросов клиентов, новых технологий и макротенденций в обществе, экономике, экологии и политике [7].

#### **Проблематика инновационного развития промышленных компаний в нефтегазовом секторе и потребность в системном технологическом скаутинге**

Инновационное развитие нефтегазовых компаний сталкивается с рядом взаимосвязанных ограничений внешней среды. За последние десятилетия мировая нефтегазовая отрасль претерпела значительные изменения, в результате которых функции нефтяных компаний во многом сместились в сторону получения лицензий на разработку месторождений, привлечения инвестиций и управления бизнес-процессами. При этом значительная часть технических работ по поиску, разведке и добыче углеводородов выполняется специализированными сервисными компаниями. Такая трансформация обусловлена, прежде всего, растущей сложностью и многообразием технологических операций на всех

этапах освоения месторождений, а также типичными вызовами отрасли, включая волатильность цен на сырьё, энергетический переход и декарбонизацию, а также высокую технологическую сложность производства.

Инновационное развитие нефтегазового сектора предполагает масштабные долгосрочные инвестиции, направленные как на добычу сырья, так и на формирование современной высокотехнологичной инфраструктуры и развитие наукоёмких направлений. Данный процесс обусловлен, прежде всего, ростом технологической сложности множества разнородных операций при поиске, разведке и эксплуатации месторождений, а также увеличением числа участников отрасли [7].

В сложившихся условиях традиционные подходы к исследованиям и разработкам, основанные на закрытых инновациях и поэтапных усовершенствованиях, оказываются недостаточными для обеспечения необходимой оперативности адаптации и снижения технологических рисков. Одновременно наблюдается стремительное развитие и расширение спектра доступных внешних технологий, включая цифровые платформы, методы машинного обучения, инновационные материалы с улучшенными эксплуатационными характеристиками, технологии улавливания и хранения углерода и др. Несмотря на высокий потенциал данных решений в части повышения операционной эффективности и экологической безопасности, их успешное применение требует своевременного выявления, оценки и внедрения.

В то же время нефтегазовые компании сталкиваются с рядом ограничений при внедрении технологического скаутинга. Высокая капиталоемкость крупных проектов обуславливает необходимость длительной верификации и апробации новых технологических решений, что замедляет распространение инноваций внутри организаций. Дополнительными барьерами выступают наличие устаревшего оборудования, а также строгие требования к промышленной и информационной безопасности. Любые цифровые решения должны

проходить комплексную оценку по стандартам «Здоровье, безопасность и окружающая среда» (Health, Safety & Environment, HSE), а также соответствовать требованиям кибербезопасности. В этих условиях традиционные закрытые модели исследований и медленные инкрементальные улучшения не позволяют обеспечить достаточную скорость адаптации и эффективное снижение технологических рисков при внедрении цифровых технологий.

Модель HERMES [8] предполагает использование внешних технологических источников в трёх ключевых случаях: (а) при недостатке внутренних ресурсов компании; (б) при превосходстве внешних технологических решений; (в) при высокой распространяемости технологических знаний и низких рыночных барьерах. Внедрение технологического скаутинга в нефтегазовой промышленности позволяет одновременно решать ряд задач:

- систематическое выявление перспективных внешних технологий на ранних стадиях (патентные тренды, стартапы, академические разработки);
- регулярная оценка коммерческого и технического потенциала решений с учётом отраслевых ограничений (безопасность, сертификация, масштабируемость);
- снижение рисков и сокращение сроков вывода пилотных решений за счёт применения отработанных практик тестирования и партнёрских моделей;
- повышение эффективности разведки и добычи за счёт внедрения новых методов сейсморазведки, бурения, гидравлического разрыва пласта (ГРП) и разработки решений для сложных технологических задач.

Результаты исследований Высшей школы экономики, отражающие уровень проникновения цифровых технологий в деятельность российских компаний, представлены на рисунке 1 [9].

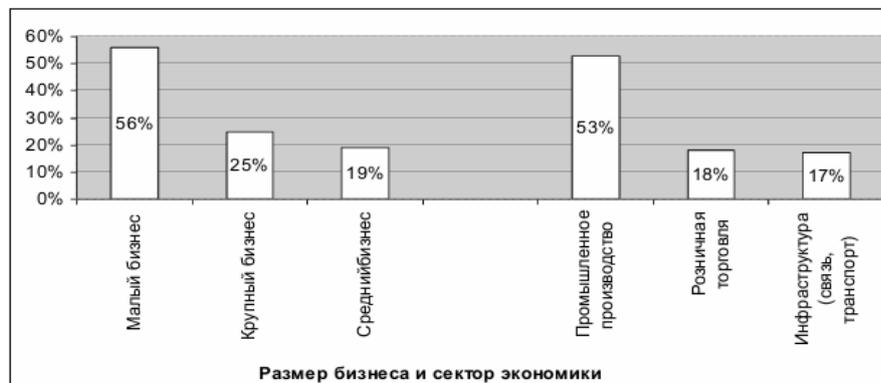


Рисунок 1. Проникновение цифровых технологий в деятельность российских компаний по размеру бизнеса и сектору экономики [9]

Исходя из графика возможно сделать вывод о высокой доле внедрения цифровых технологий в малом бизнесе поскольку они быстрее коммерциализируют цифровые прототипы, поэтому скаутинг должен активно искать идеи в стартап-экосистемах, инжиниринговых малых и средних предприятиях (Small and medium-sized enterprises, SMEs) и университетских лабораториях.

### **Структура технологического скаутинга для промышленных компаний**

Компания определяет ключевые области, в которых требуется технологическое обновление (например, повышение эффективности добычи, снижение выбросов CO<sub>2</sub>, разработка новых видов топлива, цифровизация производственных процессов). Результатом деятельности технологического скаутинга нередко становится выявление потребности в освоении новых областей знаний. Для того чтобы собранные данные трансформировались из разрозненных инициатив в действенный стратегический инструмент, процесс скаутинга должен быть выстроен как целостная и системная деятельность. В рамках данной работы можно выделить следующие основные этапы технологического скаутинга.

#### **1. Поиск и сбор информации**

Начальным этапом является глубокий и непрерывный мониторинг глобального технологического ландшафта, ориентированный на специфические вызовы нефтегазового сектора (НГС). Компания совместно со скаутинговым агентством или внутренним технологическим скаутом формирует ключевые технологические приоритеты и определяет так называемые «болевы точки».

Далее проводится систематический анализ научной литературы, патентных заявок, информации о новых стартапах, материалов отраслевых выставок и конференций, а также рыночных и технологических трендов. Для решения этих задач используются как внутренние компетенции, так и внешние партнёрские связи с образовательными учреждениями, научно-исследовательскими организациями и специализированными скаутинговыми структурами. В контексте нефтегазовой отрасли особое внимание уделяется инновациям в области добычи и переработки углеводородов, экологической и промышленной безопасности, а также цифровой трансформации.

Источники информации должны быть диверсифицированными и охватывать как внешние, так и внутренние ресурсы. К внешним источникам относятся патентные базы данных, включая Всемирную организацию интеллектуальной собственности (World Intellectual Property Organization, WIPO), Бюро патентов и товарных знаков США (United States Patent and Trademark Office, USPTO), Евразийскую патентную информационную систему (ЕАПАТИС), а также взаимодействие с R&D-центрами, бенчмаркинг, венчурные фонды и акселераторы, стартап-платформы, технологические предложения

партнёров, академические сообщества и поиск решений в смежных отраслях. Внутренними источниками выступают инженерные и производственные подразделения, сотрудники R&D, а также архивы патентов и собственных разработок компании.

#### **2. Фильтрация и оценка выявленных технологий**

Нефтегазовые компании, как и любые другие бизнес-структуры, функционируют в условиях ограниченности ресурсов и вынуждены выстраивать экономически обоснованные стратегии внедрения инноваций. В этой связи особую значимость приобретает оценка «пропускной способности» организации, то есть количества технологических решений, которые она способна рассмотреть, подвергнуть внутренней экспертизе и потенциально направить на опытно-промышленные испытания в заданный временной период.

На данном этапе осуществляется комплексная оценка технологий на соответствие стратегическим целям и критериям компании. Анализ включает изучение фундаментальных принципов технологии, её ключевых характеристик и степени соответствия текущим и перспективным задачам развития. Важным элементом оценки является определение уровня технологической зрелости по шкале готовности технологий (уровень готовности технологии, УГТ), охватывающей стадии от начальных теоретических исследований до промышленного применения. Дополнительно проводится предварительный анализ экономических параметров, включая предполагаемые затраты на внедрение, ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости. Также рассматриваются существующие рыночные аналоги, показатели эффективности технологии, потенциальные поставщики и релевантные исследовательские партнёры.

#### **3. Пилотирование и валидация**

На завершающем этапе осуществляется разработка и реализация механизмов внедрения отобранных технологий. Как правило, активная фаза технологического скаутинга на этом этапе завершается, поскольку дальнейшее управление пилотными проектами, их масштабирование или интеграция в производственные процессы переходят в зону ответственности внутренних команд НГС-компании. При этом скаутинговые агентства могут привлекаться для методической поддержки, сопровождения внедрения или запуска новых циклов скаутинга.

Результативность технологического скаутинга определяется инициативами, приводящими к внедрению нового продукта, успешному пилотированию технологии или началу сотрудничества с технологическим исполнителем. С точки зрения эффективности процесса средняя конверсия от первоначального пула потенциальных решений или заинтересованных сторон (лидов) к квалифицированным предложениям, передаваемым заказчику для дальнейшей проработки, составляет, по

различным оценкам, от 3 % до 10 %. Данный показатель может существенно варьироваться в зависимости от специфики рынка и характера технологического запроса корпорации [10].

#### Анализ практических примеров стратегий компаний нефтегазового сектора

Рассмотрим опыт технологического скаутинга у ПАО «Газпром нефти», ПАО «Татнефть» и ПАО «Роснефти» и ПАО «Сибур Холдинг», так как данные организации внедряют различные программы и инициативы, направленные на стимулирование инновационной деятельности и сотрудничество с технологическими стартапами.

В 2025 году акселератор компании «Газпром нефть» «IndustriX» открыл прием заявок от разработчиков решений и технологий для топливно-энергетический комплекса (ТЭК). Участники получают менторскую поддержку, возможность тестирования пилотных проектов на площадке предприятия и претендовать на венчурное финансирование и другие формы поддержки для вывода продукта на рынок. За два года было получено более 3000 заявок и привлечено 50 стартапов [11]. Также компания проводит кейс-чемпионат «TECH SQUAD», является партнером многих инновационных кластеров и институтов развития (АСИ, Фонд «Сколково»). Для привлечения технологов и реализации бизнес-проектов компания создала онлайн-платформу «Профессионалы 4.0» для специалистов, которые могут предложить свои навыки для работы над кейсами компании, не устраиваясь в нее на постоянную работу.

Из этого можно сделать вывод о том, что компания «Газпром нефть» имеет развитую и публичную систему технологического скаутинга, а также активно использует весь спектр инструментов открытых инноваций для поиска и внедрения технологий.

ПАО «Татнефть» имени В.Д. Шашина демонстрирует активный подход к инновациям, особенно в области поиска продуктов и технологий, которые помогают предприятиям решать актуальные задачи и развивать стратегически значимые для них направления. Для решения своих задач «Татнефть» публикует на сайте Национальной ассоциации трансфера технологий (НАТТ) большой спектр запросов, в рамках которых нужно разработать, испытать и адаптировать технологию под потребности предприятия (см. рисунок 2). А также совместно с Фондом «Сколково» разработали программу по развитию биотехнологий [12], проводит поиск технологий в формате кейс-чемпионата «TatneftTechCupChallenge» и корпоративного хакатона «ТехШторм».



Рисунок 2. Статистика запросов на сайте НАТТ до 2025 г.

Компания «Сибур» активно внедряет инновации для повышения эффективности производства, расширения продуктовой линейки и развития устойчивых решений. Организует чемпионаты профессионального мастерства «PetroChemSkills» в том числе реализует акселерационную программу «Полимерные инновации», которая реализуется как целевая инициатива «СИБУРа» («Нефтехимия будущего») и «Сколково» в рамках Десятилетия науки и технологий. «Сибур» в своих научно-исследовательских и технологических центрах ведет внутренние разработки, но и выступает площадкой для сотрудничества с внешними партнерами, университетами, стартапами и клиентами. Предприятие демонстрирует очень активный и структурированный подход к технологическому скаутингу, интегрированный в его стратегию открытых инноваций. В 2024 году «СИБУР» реализовал более 250 проектов, направленных на цифровизацию и автоматизацию производственных и бизнес-процессов [13].

ПАО «Роснефть» широко развивает свою цифровую трансформацию, создавая передовые технологические решения на базе искусственного интеллекта и регулярно выступает партнером Международного инженерного чемпионата CASE-IN и проводит студенческий фестиваль «Будущее Роснефти» – командное соревнование студентов вузов России и стран СНГ в решении инженерных кейсов. В 2024 году «Роснефть» получила более 70 патентов на инновационные изобретения и владеет более чем 1100 объектами интеллектуальной деятельности, прошедшими государственную регистрацию [14].

#### Заключение

Взаимодействие российских компаний с внешними инновационными партнерами постепенно эволюционирует, однако во многих случаях по-прежнему ограничивается точечной поддержкой отдельных технологий или проектов. Несмотря на растущий интерес крупных игроков нефтегазового и нефтехимического сектора, таких как «Газпром нефть», «Татнефть», «СИБУР» и «Роснефть», к инструментам открытых инноваций (акселерационные программы, сотрудничество с вузами, корпоративные венчурные структуры), данные инициативы, как правило, интегрируются в

существующую операционную деятельность и не приводят к глубокой трансформации бизнес-моделей или стратегий роста.

В условиях современного рынка эффективное управление инновациями является критически важным фактором обеспечения устойчивости и конкурентоспособности нефтегазовых компаний. Российские организации, несмотря на наличие объективных ограничений, связанных с регуляторной средой, трудностями в доступе к финансированию, сложностями управления инновационными проектами и проблемами в сфере защиты интеллектуальной собственности [15], демонстрируют устойчивый рост интереса к инструментам открытых инноваций, акселерационным программам и формированию долгосрочных партнёрств с научно-образовательными учреждениями.

Из изложенного выше следует, что интеграция технологического скаутинга на всех уровнях принятия управленческих решений – от стратегического планирования до операционного внедрения — способствует формированию устойчивых конкурентных преимуществ, повышению способности компаний к быстрой адаптации и обеспечению долгосрочного развития в динамичной и высококонкурентной рыночной среде. В этом контексте инвестиции в технологический скаутинг следует рассматривать как инвестиции в будущее, позволяющие трансформировать внешние технологические возможности в измеримые бизнес-результаты.

#### Литературные источники

1. Ценжарик М.К., Крылова Ю.В., Штешенко В.И. Цифровая трансформация компаний: стратегический анализ, факторы влияния и модели // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. – 2020. – Т. 36, № 3. – С. 390–420.
2. Raar J. Mapping the Technological Landscape to Accelerate Innovation. Foresight and STI Governance. – 2020. – Vol. 14, № 3. – P. 41–54.
3. Bodelle, Jacques, and Claude Jablon. Science and Technology Scouting at Elf Aquitaine. Research-Technology Management, 1993. – Vol. 36, №5. – P. 24–28. – DOI:10.1080/08956308.1993.11670924.
4. Spitsberg, I. et al. Technology Landscape Mapping: At the Heart of Open Innovation, Research-Technology Management. – 2013. – Vol. 56, №4, – P. 27–35. – DOI: 10.5437/08956308X5604107.
5. Langa W., Mkwambisi D., & Dougill A. Systematic Review of Open Innovation Approaches for Industrialisation in Developing Economies. Foresight and STI Governance. – 2025. – Vol. 19, №3, – P. 17-33. – DOI: 10.17323/fstg.2025.27979
6. Cooper, R. G. Winning at new products: creating value through innovation / R. G. Cooper. – Т. 4. – New York: Basic Books. – 2011. – 391 с. – ISBN 978-0-465-02578-7.
7. Применение инструментов скаутинга для повышения конверсии гипотез из первоисточников идей в технологии на испытание / Демо В.О., Жуков В.В., Филимонов А.В. [и др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2023. – Т. 8, № 1. – С. 147–157.
8. Commission of the European Communities. HERMES: Harmonised Econometric Research for Modelling Economic Systems. North-Holland, 1993. – 719 p. – ISBN 9780444897602.
9. Курносова, Е. А. Цифровая экономика является основой инновационного развития промышленных предприятий РФ // Актуальные теоретические и прикладные вопросы управления социально экономическими системами: Материалы Международной научно-практической конференции. – М : Институт развития дополнительного профессионального образования, 2019. – С. 8–10.
10. Официальный сайт «GoTech Innovation» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gotechinnovation.com/ru/> (дата обращения: 10.12.2025).
11. Официальный сайт «Neftegaz.RU» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/news/companies/784631-akselerator-gazprom-nefti-industrixyobyavil-opoiske-startapov-na-urovne-idey/> (дата обращения: 15.12.2025).
12. Официальный сайт «Сколково» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sk.ru/news/tatneft-i-skolkovo-zapustili-bioteh-akselerator/> (дата обращения: 15.12.2025).
13. Официальный сайт «ПАО «Сибур»» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://career.sibur.ru/faq/?ysclid=mj796f9jlb43400182> (дата обращения: 15.12.2025).
14. Официальный сайт «Независимая газета» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.ng.ru/society/2025-02-09/7\\_9188\\_1510090225.html](https://www.ng.ru/society/2025-02-09/7_9188_1510090225.html) (дата обращения: 15.12.2025).
15. Устинов В.А. Переход к использованию модели открытых инноваций: тенденции, проблемы и перспективы // Журнал экономических исследований. – 2017. – Т.3, №7. – С. 1-17.

УДК 628.3

Зверева О.В., Рублева С.А., Верхососова А.И., Разводов А.В.

### Требования к повторно используемым сточным водам

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики, zvereva.o.v@muctr.ru;

Рублева Софья Алексеевна – преподаватель кафедры

Верхососова Анастасия Игоревна – аспирант

Разводов А.В. – студент 4 курса

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассматривается проблема загрязнения водоёмов промышленными сточными водами и пути её решения. Основное внимание уделяется стратегии сокращения водопотребления и негативного воздействия на окружающую среду за счёт создания оборотных систем водоснабжения и повторного использования очищенных сточных вод. Подчёркивается, что даже при соблюдении норм ПДК сброс стоков наносит необратимый ущерб водным объектам. В работе анализируются технологические и санитарно-гигиенические требования к качеству воды, используемой в производственных процессах, в частности, в системах охлаждения. Особое внимание уделяется проблемам образования отложений и коррозии в оборудовании, которые напрямую связаны с солевым составом воды. Делается вывод, что, несмотря на увеличение затрат на водоподготовку, рациональное водопользование и внедрение малоотходных технологий являются наиболее эффективными мерами для защиты окружающей среды и снижения эксплуатационных расходов.*

*Ключевые слова:* оборотное водоснабжение, промышленные сточные воды, качество воды, защита водоёмов, образование отложений

### Requirements for Reclaimed Wastewater

Zvereva O.V., Rubleva S.A., Verkhososova A.I., Razvodov A.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

*The article addresses the problem of water pollution by industrial wastewater and ways to solve it. The main focus is on the strategy of reducing water consumption and the negative impact on the environment through the creation of recirculating water supply systems and the reuse of treated wastewater. It is emphasized that even when compliance with maximum permissible concentration standards is achieved, wastewater discharge causes irreversible damage to water bodies. The paper analyzes technological and sanitary-hygienic requirements for water quality used in industrial processes, particularly in cooling systems. Special attention is paid to the problems of scale formation and corrosion in equipment, which are directly related to the salt composition of the water. It is concluded that, despite the increase in water treatment costs, rational water use and the implementation of low-waste technologies are the most effective measures for environmental protection and the reduction of operating expenses.*

*Keywords:* recirculating water supply, industrial wastewater, water quality, protection of water bodies, scale formation

#### Введение

Мероприятия по охране, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов стали в нашей стране неотъемлемой частью государственных планов. Это позволяет при высоких темпах научно-технического прогресса планомерно и целенаправленно использовать его достижения для поддержания необходимого экологического равновесия.

Основные направления экономического и социального развития РФ на ближайшие годы предусматривают:

- ускорение научно-технического прогресса на основе разработки новых технологических процессов;
- внедрение на производстве безотходных технологий;
- комплексное экономическое расходование сырьевых ресурсов.

Все это способствует решению актуальной проблемы современности – охраны окружающей среды, в частности, защиты водоемов от истощения и загрязнения сточными водами [1-3].

#### Теоретическая часть

Производственные сточные воды загрязняются продуктами переработки сырья, а также различными примесями веществ, используемых в технологическом процессе. Сброс сточных вод в водоемы приводит к их загрязнению, которое даже в случае выполнения требований по предельно допустимым концентрациям (ПДК) вызывает необратимые изменения в водоеме. Наиболее эффективным мероприятием по защите водоемов от загрязнений сточными водами является совершенствование технологического процесса, включающего изменение технологии, замену оборудования и сырья, а также использование

сточных вод в системе водоснабжения промышленного предприятия.

Сокращение объема воды, потребляемой на единицу выпускаемой продукции, в первую очередь достигается созданием оборотных систем водоснабжения промышленных предприятий. Несмотря на это, расход свежей воды, забираемой из источника водопользования предприятиями, велик. При повторном использовании промышленных сточных вод уменьшается их сброс в водоемы, что способствует улучшению санитарного состояния водоемов, а также сокращается, а в отдельных случаях полностью исключается забор свежей воды для технических нужд. Рациональный выбор системы водоснабжения промышленного предприятия позволяет до минимума сократить расход свежей воды, однако почти во всех случаях приводит к увеличению затрат на ее подготовку для многократного использования. В любой системе водоснабжения промышленных предприятий часть воды теряется безвозвратно, поэтому минимальный расход подпитывающей воды не может быть меньше потерь в системе.

Затраты на водное хозяйство можно снизить в результате замены технологических процессов менее водоемкими, обеспечения необходимого качества воды, возврата очищенных сточных вод в производство и утилизации ценных веществ, содержащихся в сточных водах.

Требования к качеству воды зависят от функционального использования ее в технологическом процессе. Их можно разделить на технологические и санитарно-гигиенические. Технологические требования обуславливаются видом производства и определяются в каждом конкретном случае технологическим процессом. К санитарно-гигиеническим требованиям относятся безопасность воды для здоровья людей, а также исключение возможности загрязнения окружающей среды.

Санитарно-гигиенические требования приобретают особенно важное значение при использовании хозяйственно-бытовых сточных вод в охлаждающих системах промышленного водоснабжения. Для открытых, наиболее распространенных на промышленных предприятиях охлаждающих систем водоснабжения эти воды должны характеризоваться следующими данными: запах – до 2 баллов, содержание взвешенных веществ – до 1,5 мг/л, БПК<sub>5</sub> – до 3 мг/л, ХПК – до 20 мг/л, содержание специфических ингредиентов – не более ПДК для водных объектов, коли-индекс – не более 100. Для закрытых охлаждающих систем допускается увеличение приведенных значений на 10...30 % [4-6].

Несмотря на различия в технологических требованиях, предъявляемых различными промышленными предприятиями к качеству воды для систем охлаждения, общим является отсутствие отложений и коррозии трубопроводов и оборудования в системе охлаждения воды.

Образование отложений в оборотной системе водоснабжения тесно связано с солевым составом

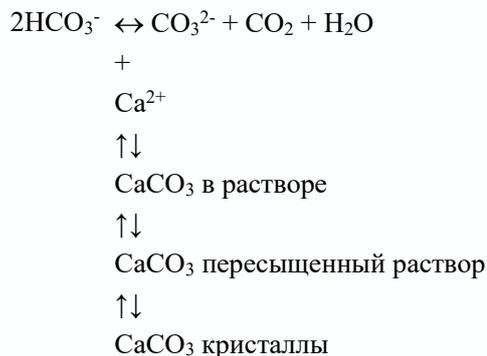
воды, используемой для подпитки. Наличие плохорастворимых солей кальция и магния, вызывающих жесткость воды, приводит к отложениям на трубопроводах и оборудовании. Наиболее распространены кальциевые накипи — карбонаты и сульфаты. Размер отложений возрастает с увеличением расхода сточных вод в оборотных системах и сокращением объема продувочных вод. Возможность образования отложений обычно оценивают индексом насыщения. Склонность воды к образованию отложений обычно оценивают индексом насыщения:

$$J = pH_0 - pH_s \quad (1)$$

где  $pH_0$  – водородный показатель испытываемой воды;

$pH_s$  – водородный показатель в условиях насыщения воды карбонатом кальция.

При  $pH_0 > pH_s$  вода склонна к образованию отложений. Отклонение индекса насыщения на  $\pm 0,25$  вызывает изменение состояния системы. Однако определение состояния пересыщения раствора при помощи индекса насыщения недостаточно точно. Основным соединением, имеющим наибольшее процентное содержание в составе накипи, является карбонат кальция. Образование карбоната кальция происходит в результате распада бикарбонатных ионов по следующей схеме:



Поэтому целесообразно использовать индекс движущей силы процесса:

$$I = \frac{[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}]}{\text{PPCaCO}_3 \cdot 24 \cdot 10^8} \quad (2),$$

где  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  – концентрация ионов кальция и карбоната, мг/л;

PPCaCO<sub>3</sub> – произведение растворимости карбоната кальция.

Вода будет стабильной при  $I = 6...7$ . Увеличение значения  $I$  приводит к коррозии трубопроводов, а уменьшение – к образованию карбонатных отложений.

Допустимое количество взвешенных веществ в воде оборотной системы водоснабжения зависит от вида холодильников, используемых в системе охлаждения. При определении этого количества учитывают скорость движения воды, при которой отложения в системе не образуются.

В системах, подверженных биологическому обрастанию, грубодисперсные примеси отлагаются на стенках. При оптимальной скорости движения воды в теплообменнике 1 м/с содержание взвеси 150 мг/л вызывает уменьшение теплопередачи на 20 %, а 500 мг/л – на 35 %. Снижение скорости до 0,9 м/с вызывает незначительный рост отложений, а увеличение ее до 1,6 м/с приводит к практически полному отсутствию отложений взвешенных веществ.

Охлаждающая вода не должна содержать сероводорода и железа, так как оксиды железа вызывают железистые отложения, которые способствуют появлению железобактерий [1, 6-11], а сероводород обуславливает появление коррозии металлических трубопроводов главным образом за счет появления и развития в воде серобактерий. Коррозионную активность воды определяют по десятибалльной шкале коррозионной стойкости металлов. Увеличение содержания карбоната кальция, а также температуры и общего соледержания приводит к образованию накипи в оборотной системе водоснабжения.

#### Заключение

Эффективное использование воды позволяет экономить водные ресурсы и снижает нагрузку на природные источники. За счет сокращения потребления воды уменьшается расход воды на водоочистных станциях и в ирригационных системах, что впоследствии приводит к сокращению сбросов сточных вод. Из-за неограниченного потребления нехватка воды может возникнуть даже при средних климатических условиях. Неэффективное использование воды также влияет на обеспечение экологических потоков и способствует ухудшению состояния окружающей среды и экономической нестабильности. Поэтому важно рационально использовать воду, чтобы сократить разрыв между объемами добычи и потребления воды.

#### Список литературы

1. Технология безреагентного обезжелезивания артезианской воды для нужд оборотного водоснабжения металлургических предприятий / Е. Н. Кузин, Ю. М. Аверина, А. Ю. Курбатов, П. А. Сахаров // Черные металлы. – 2020. – № 10. – С. 66-71.

2. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В.

Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 183-192. – DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.

3. Development and design of a closed water use cycle / J. M. Averina, G. E. Kaliakina, D. Y. Zhukov [et al.] // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 : Conference proceedings, Albena, 30 июня – 06 2019 года. Vol. 19. – Albena: Общество с ограниченной ответственностью СТЕФ92 Технолоджи, 2019. – P. 145-152. – DOI 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019.

4. Development of Nanofiltration Ceramic Membrane Production Technology / Y. M. Averina, A. Y. Kurbatov, D. A. Sakharov, E. N. Subcheva // Glass and Ceramics. – 2020. – Vol. 77, No. 3-4. – P. 98-102. – DOI 10.1007/s10717-020-00248-x

5. Кавитационная обработка воды. Свойства воды и эффективность обработки / Ю. М. Аверина, Н. А. Моисеева, Д. А. Шувалов [и др.] // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 14(210). – С. 17-19.

6. Ахметова, В. Н. Контроллинг на малых инновационных предприятиях / В. Н. Ахметова, Е. А. Барабанщикова, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 15(196). – С. 76-77.

7. Аверина, Ю. М. Комплексный подход к проблеме обезжелезивания воды / Ю. М. Аверина, Д. В. Павлов, С. О. Вараксин // Водоочистка. – 2010. – № 12. – С. 23-26.

8. Аверина, Ю. М. Обезжелезивание воды с замкнутым циклом водопользования / Ю. М. Аверина, Д. В. Павлов, С. О. Вараксин // Вода: химия и экология. – 2011. – № 2(32). – С. 18-22.

9. Анализ организационно-технологического инжиниринга энергоресурсоэффективных экологически безопасных малотоннажных лакокрасочных производств / В. С. Болдырев, В. В. Меньшиков, Б. Б. Богомолов [и др.] // Химическая технология. – 2021. – Т. 22, № 4. – С. 183-192. – DOI 10.31044/1684-5811-2021-22-4-183-192.

10. Композиционные материалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Е. Н. Субчева, Ю. М. Аверина, Е. В. Юртов, О. В. Зверева. – Москва : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2017. – 128 с.

11. Осипов, Г. А. Актуальные проблемы обращения с отходами в Российской Федерации / Г. А. Осипов, Ю. М. Аверина, А. С. Куценко // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 4(266). – С. 158-164.

УДК 544

Кудая Яво Юг, Ндао Ибрахима

## Исторические аспекты развития химического образования и науки в Того и Сенегале

Кудая Яво Юг, студент 1-го курса бакалавриата факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва;  
Ндао Ибрахима, студент 1-го курса бакалавриата факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва  
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*В статье представлены основные этапы развития химического образования и научных исследований в Республиках Того и Сенегал. Эти государства прошли путь от времени колониального господства, когда начальное и высшее образование не было доступно большинству населения, до создания национальной системы высшего образования, научно-исследовательских центров и лабораторий. Химическое образование в Того и Сенегале, где имеются значительные запасы полезных ископаемых, возобновляемых и невозобновляемых источников сырья, необходимо для дальнейшего экономического развития этих государств. В решении этой задачи значительную роль играет международное сотрудничество в вопросах науки и образования между странами Африки и Россией.*

*Ключевые слова: химическое образование, химические исследования, химическая технология, образование в африканских государствах*

## HISTORICAL ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF CHEMICAL EDUCATION AND SCIENCE IN TOGO AND SENEGAL

Kudaya Yavo Yug, Ndao Ibrahima

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*The article presents the main stages of the development of chemical education and scientific research in the Republics of Togo and Senegal. These States have gone from the time of colonial rule, when primary and higher education was not available to the majority of the population, to the creation of a national higher education system, research centers and laboratories. Chemical education in Togo and Senegal, where there are significant reserves of minerals, renewable and non-renewable sources of raw materials, is necessary for the further economic development of these States. International cooperation in science and education between African countries and Russia plays a significant role in solving this problem.*

*Keywords: chemical education, chemical research, chemical technology, education in African countries*

### Введение

В настоящее время химическая наука и технология является одним из наиболее быстрым развивающимся направлением знаний, которое во многом определяет мировое развитие человечества. Специалисты в области химии успешно работают на химических и нефтехимических предприятиях, в пищевой и фармацевтической промышленности, на металлургических заводах и в сельском хозяйстве.

### Химическое образование и наука в Того

До 1960 года в Того не было высших учебных заведений, готовящих специалистов и преподавателей в области химии. Обучение этой науке осуществлялось лишь на уровне общего школьного образования (Рис 1). Особое влияние на процесс обучения в стране оказало колониальное прошлое. В 1960 году Того провозгласила независимость, а через год в стране была принята Конституция Тоголезской республики, в соответствии с которой высшим законодательным органом Того стало Национальное собрание [1-2].

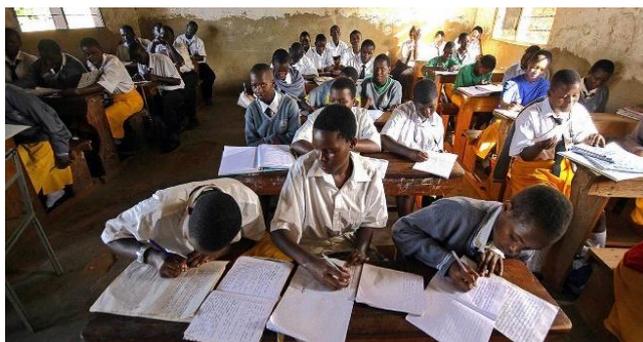


Рис. 1. Обучение в африканских школах

С 1963 года власть в республике перешла к избранному президенту, который в сфере политического и экономического развития, а также в вопросах образования ориентировался на сотрудничество с Францией. В 1965 году был основан первый Институт высшего образования в Того, который был общим также для соседнего Бенина (Дагомеи). Это высшее учебное заведение стало первым шагом в развитии подготовки национальных

специалистов, в том числе в области химии, медицины и биологии (Рис. 2).



Рис. 2. Обучение и проведение исследований в университетских лабораториях

Недостаток учебных заведений высшего образования привел к слабой адаптации обучающихся к потребностям местной промышленности и научных учреждений. В 1970 году в столице Того городе Ломе был открыт Университет Бенина, который создал условия получения высшего химического образования. В этот период активно создаются новые химические лаборатории, готовятся национальные кадры, проводятся исследования и защищаются диссертации. В 1994 году была образована Западно-Африканская химическая ассоциация (SOACHIM), основной целью которой стало сотрудничество африканских государств в области химического образования и научных исследований. Заметную роль в этом процессе сыграла Республика Того.

В 2001 году Университет Бенина был переименован в Университет Ломе (Рис. 3), где был открыт «Факультет Науки» с углубленным преподаванием химии. В 1993 году Европейская комиссия заморозила партнерство ЕС с Республикой Того по политическим причинам, что негативно сказалось на экономической ситуации в стране. Однако в 2004 году в результате проведенных переговоров это сотрудничество было возобновлено.

Подготовка квалифицированных национальных кадров в области химии и химической технологии является важной задачей для развития экономики Того. Дело в том, что на территории страны существуют месторождения полезных ископаемых, среди которых особый интерес представляют алюминий, бокситы, графит, доломиты, железо, золото, известняк, каолин, мрамор, фосфаты, поваренная соль, уран и хром. При этом грамотность населения по статистическим данным составляет около 80 % у мужчин и 55 % у женщин.

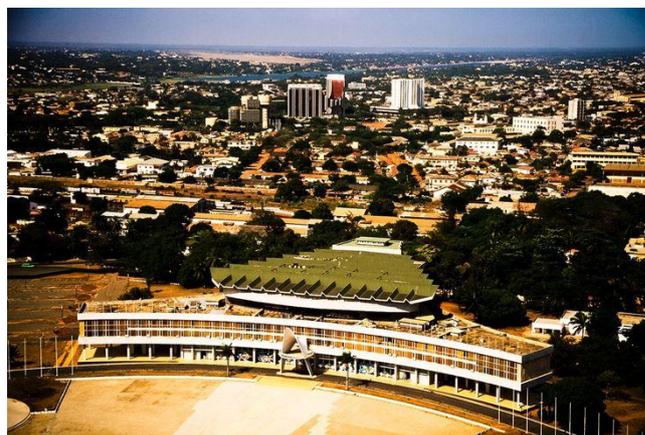


Рис. 3. Столица Республики Того город Ломе

Экономика Того базируется на сельском хозяйстве (экспорт хлопка, кофе и какао) и добыче полезных ископаемых (Того занимает четвертое место в мире по экспорту фосфатов). Например, порт в Кпеме является специализированным местом для вывоза фосфоритов. Несмотря на доминирование сельскохозяйственного направления в экономике страны, Того продолжает импортировать значительную часть продовольствия и практически не занимается глубокой переработкой невозобновляемых ресурсов, ограничиваясь часто лишь экспортом полезных ископаемых (Рис. 4).

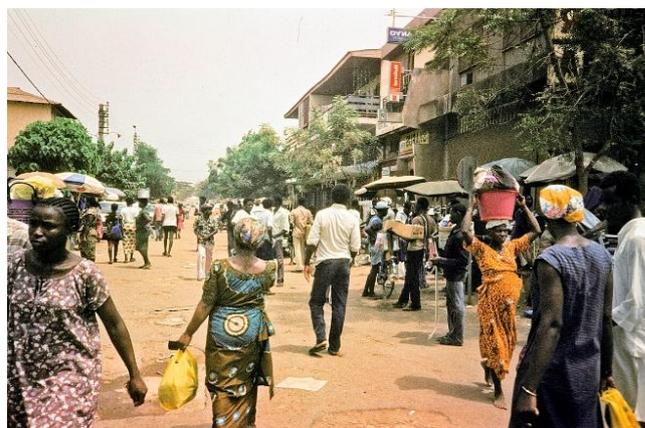


Рис. 4. Основная часть населения Того занимается сельским хозяйством или работает в сфере обслуживания

Дальнейшее экономическое развитие Того тесно связано с переходом на интенсивное сельскохозяйственное производство с использованием агрохимии и созданием современных технологий и предприятий по переработке природных ресурсов. Эти задачи решает Министерство высшего образования и науки под руководством известного тоголезского химика профессора Гадо Чангбеджи.

#### Химическое образование и наука в Сенегале

Сенегал долгий исторический период находился под колониальным господством, как многие современные государства Африканского континента. До обретения независимости Сенегал не имел

развитой инфраструктуры для получения химического и медицинского образования. Высшее образование было не доступно большинству коренного населения страны и его получали в основном в университетах Франции [3]. В 1958 году Сенегал был провозглашен самоуправляющейся республикой в составе Французского Сообщества, а в 1960 году Республика Сенегал стала независимым государством (Рис. 5).



Рис. 5. Дакар является столицей Республики Сенегал

Вместе с независимостью пришли проблемы подготовки национальных специалистов в области науки и образования. В 1960 году был основан Дакарский университет, в котором были открыты научные факультеты, включая химический. Огромную роль в развитии химической науки в Сенегале имела образовательная и исследовательская деятельность известных сенегальских ученых, среди которых можно назвать Шейха Анта Диопа. Именно этот выдающийся исследователь основал первую лабораторию радиоуглеродного анализа в Западной Африке, доказал африканское происхождение Египетской цивилизации, стал автором многих открытий. Всей своей научной и образовательной деятельностью Шейх Анта Диопа показал пример служения интересам и развитию Сенегала. Благодаря его исследованиям, сегодня ученые Сенегала активно занимаются изучением природных биологически активных веществ, вопросами очистки воды, созданием высокоэффективного органического земледелия, решают экологические вопросы, проводят анализ продуктов питания, разрабатывают инновационные технологии переработки различных природных ресурсов. Университет Дакара готовит высоко квалифицированных специалистов в области органической, неорганической и аналитической химии, биохимии, фармацевтики, агрохимии и экологической химии. В Дакарском институте Пастера проводятся исследования по разработке новых лекарств и вакцин. Лаборатория профессора Сулеймана Мбуа проводит исследования в области биомедицины. Высшие политехнические школы Сенегала готовят инженеров химических производств для работы на промышленных предприятиях, занимающихся переработкой нефтегазовых и других природных ресурсов. В настоящее время развитие химической науки и образования в Республике

Сенегал является гарантией экономического развития этой страны.

### Заключение

На рубеже 60-х годов XX века многие страны Африканского континента стали независимыми государствами, освободившимися от колониального господства. Воспитание и обучение специалистов в области образования, науки и производства стало первостепенной задачей для их дальнейшего экономического развития. Огромное значение для решения этой задачи имеет не только создание современных университетов, но и эффективное сотрудничество в сфере высшего образования с ведущими учебными организациями России (Рис. 6).

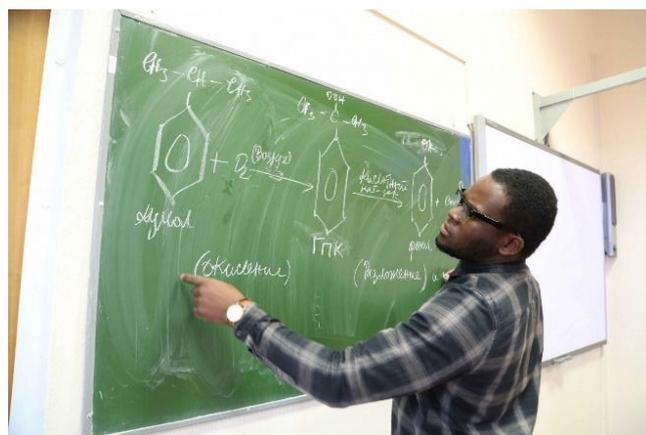


Рис. 6. Сотрудничество с высшими учебными заведениями России является важным фактором подготовки специалистов в области химии

Сегодня история развития химического образования и науки в Республиках Того и Сенегал – это пример трудного пути развития от начального школьного образования до современного университетского обучения, от использования отсталых аграрных технологий до современных научных исследований в области фундаментальной и прикладной химии, биохимии, фармации и агрохимии.

Данная публикация подготовлена по результатам работы студенческого научного кружка кафедры Физической и коллоидной химии РУДН имени П. Лумумбы

### Список литературы

1. Сокова З.Н. Западная Африка: становление национальной государственности // Вестник Тюменского государственного университета. Гуманитарные исследования. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 150-165.
2. Камара Сиди. История понятия государства в Западной Африке: от разрушения империй до появления современного государства в результате колонизации // Вестник РУДН. Серия: Всеобщая история. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 28-34.
3. Дау М.Л. Геополитическое значение Западной Африки для африканского региона // Этносоциум. – 2023. – Т. 179, № 5. – С. 80-90.

УДК 676.044.5:676.046.5:658.5

Челкина К.С., Зверева О.В.

**Сравнительный анализ ресурсоэффективности технологий переработки макулатуры различного качества**

Челкина Ксения Сергеевна – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики;  
Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,  
zvereva.o.v@muctr.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье представлен сравнительный анализ технологий переработки макулатуры для производства тарного картона и белой писчей бумаги. Исследование охватывает технологические процессы очистки и облагораживания макулатурной массы, а также включает детальную оценку энергетических и водных ресурсов. Проведенный анализ выявляет значительные различия в технологических подходах и ресурсоемкости при производстве двух видов продукции.*

*Ключевые слова: переработка макулатуры, энергопотребление, водопотребление, ресурсоэффективность*

**Comparative analysis of resource efficiency of different quality waste paper processing technologies**

Chelkina K.S., Zvereva O.V.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*The article presents a comparative analysis of waste paper recycling technologies for containerboard and white writing paper production. The study examines technological processes of waste paper pulp cleaning and upgrading, and includes detailed assessment of energy and water resources. The analysis reveals significant differences in technological approaches and resource intensity between the two production types.*

*Keywords: waste paper recycling, energy consumption, water consumption, resource efficiency*

**Введение**

Широкий ассортимент бумажно-картонной продукции, различия в условиях эксплуатации и особенностях сбора обуславливают существенную неоднородность состава макулатуры. Многолетняя практика переработки подтвердила, что для получения продукции заданного качества необходимо использовать строго определённые виды вторичного волокна. Отступление от этого принципа приводит либо к ухудшению потребительских свойств готовых изделий, либо к значительному удорожанию технологического процесса. Использование макулатуры, извлеченной из твердых бытовых отходов (ТБО), способствует сокращению площади городских свалок. Это, в свою очередь, снижает риск самовозгораний на них и выброса опасных веществ, загрязняющих атмосферу, почву и водные ресурсы. Следовательно, переработка макулатуры из ТБО является не только экономически

целесообразной, но и экологически обоснованной мерой [1, 2].

**Аналитическая часть**

Целью сравнительного анализа является количественная и качественная оценка экономической и экологической эффективности переработки целлюлозных волокон бумаги и картона. Для наглядности, сравнение будет проводиться между двумя условными технологическими линиями:

1. Производство тарного картона (низкая степень очистки и облагораживания).
2. Производство белой писчей бумаги (высокая степень очистки и облагораживания).

Экономическая и экологическая эффективность использования макулатуры в качестве сырья для производства бумаги становится очевидной при детальном рассмотрении структуры затрат на энерго- и водопотребление. Характеристики и сфера применения образцов сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики и сфера применения образцов сравнения

Параметр	№1: Тарный картон	№2: Белая писчая бумага
Исходное сырье	Гофрокартон, смешанные отходы (МС-5Б, МС-6Б, МС-7).	Белая офисная бумага, бумага для печати (МС-1, МС-2).
Ключевые технологии	Роспуск, грубая очистка (сита, циклоны), простое рафинирование.	Глубокая очистка: многоступенчатые сита, циклоны, целлюлозные экраны. Облагораживание: Деинкинг (флотация или промывка), диспергирование, интенсивное рафинирование, введение отбеливателей и проклеивающих агентов.
Свойства волокна	Короткие, жесткие, загрязненные мелкими включениями. Низкая способность к связыванию.	Длинные, гибкие, чистые. Высокая способность к связыванию после рафинирования.

Качество продукции	Низкая белизна, шероховатая поверхность, низкая механическая прочность (на разрыв, надрыв).	Высокая белизна, гладкая поверхность, высокая механическая прочность, хорошие печатные свойства.
Сфера применения	Производство гофрированного картона, картонной тары, прокладок.	Офисная бумага, бумага для полиграфии, журналов, бланков.

Приведенные данные в таблице, свидетельствуют о том, что качество конечного продукта является прямым следствием глубины переработки. Технологии линии №2 (деинкинг, диспергирование) позволяют восстановить, насколько это возможно, волокно и вернуть ему свойства, близкие к первичному, что значительно усложняет технологический процесс переработки макулатуры. Существенная разница наблюдается в

требуемых капиталовложениях. Организация производства тарного картона предполагает низкие или средние затраты на оборудование, тогда как строительство завода по выпуску белой писчей бумаги требует на порядок больших инвестиций в технологическую инфраструктуру. Ниже в таблице 2 и 3 приведены сравнения затрачиваемой энергии и водопотребления.

Таблица 2 – Сравнение расхода и стоимости затрачиваемой энергии

Процесс	№1: Тарный картон	№2: Белая писчая бумага
Роспуск	Высокий расход. Это базовый и очень энергоемкий процесс для любого типа переработки	Высокий расход. Аналогичная причина, как и для линии №1.
Очистка и сортировка	Умеренный расход	Очень высокий расход. Здесь используются многоступенчатые системы (вибросита, центробежные сортировки, целлюлозные экраны, циклонные очистители), каждая из которых оснащена мощными насосами и двигателями.
Деинкинг (удаление краски)	Не применяется	Экстремально высокий расход. Флотационные установки требуют большого количества энергии для создания воздушно-пузырьковой смеси, работы мешалок и насосов.
Диспергирование	Не применяется	Потребляет очень большое количество электроэнергии. Диспергаторы перетирают массу при высоких температуре и давлении.
Рафинирование	Умеренный расход	Высокий расход. По сравнению с линией №1 рафинирование более интенсивное и продолжительное, так как стоит задача значительно улучшить свойства поврежденного волокна.

Таблица 3 – Сравнение расхода и очистки воды

Параметр	№1: Тарный картон	№2: Белая писчая бумага	Причина различий
Расход свежей воды (на 1 т продукции)	10–15 м <sup>3</sup>	15–25 м <sup>3</sup> (может быть выше при использовании промывного деинкинга)	Линия №2 требует больше чистой воды для процессов флотационного деинкинга и особенно для промывки массы от частиц краски после диспергирования.
Загрязненность сточных вод	Средняя. Загрязнения: взвешенные вещества, мелкие волокна.	Очень высокая. Загрязнения: взвешенные вещества, химические реагенты (от деинкинга), красители, клеи, мелкие частицы краски.	Процесс деинкинга и промывки "снимает" с волокна все загрязнения и переводит их в воду, создавая высококонцентрированные стоки.
Сложность системы очистки воды	Относительно простая: отстойники, флотаторы	Сложная и дорогая: многоступенчатая система, включающая механическую, химическую и биологическую очистку.	Высокая загрязненность стоков. Линии №2 требует применения дорогостоящих технологий для их очистки перед сбросом или возвратом в цикл.
Возможность замыкания водного цикла	Высокая. Легко достижим уровень 90–95% оборотной воды.	Ограниченная. Высокая концентрация растворенных веществ и солей в оборотной воде может мешать технологическим процессам	Для Линии №2 часто требуется постоянный подпиток свежей водой и сброс части очищенных стоков для предотвращения засоления системы.

Энергоемкость процессов значительно различается. Производство тарного картона относится к категории низкоэнергоемких, в то время как глубокая переработка макулатуры для получения белой бумаги характеризуется чрезвычайно высоким потреблением энергии, что делает энергоносители одной из основных статей расходов. Водоемкость технологических процессов представляет собой еще один дифференцирующий фактор. Производство тарного картона требует относительно небольшого количества водных ресурсов, в отличие от производства белой бумаги, где потребление воды значительно выше, что требует строительство мощных очистных сооружений.

Проведенный расчет на основе актуальных рыночных данных позволяет количественно оценить преимущества переработки вторичного волокна. Итак, энергозатраты на переработку макулатуры составляют 75–175 кВт·ч/т при среднем тарифе 8,62 руб./кВт·ч [3,4], что приводит к стоимости энергопотребления 646,5–1508,5 руб./т готовой продукции. Водопотребление технологического процесса оценивается в 63–83 м<sup>3</sup>/т при тарифе 13,56 руб./м<sup>3</sup> [5], что эквивалентно 854,28–1125,48 руб./т. Суммарные затраты на энерго- и водоснабжение при производстве бумаги из макулатуры составляют 1500,78–2633,98 руб./т.

Для производства бумаги из древесного сырья требуется значительно больше ресурсов. Энергопотребление составляет примерно 650 кВт·ч/т [6], что при том же тарифе дает 5603 руб./т. Водопотребление достигает 136 м<sup>3</sup>/т [7] (1844,16 руб./т). Общие затраты на производство бумаги из первичного сырья составляют не менее 7447,16 руб./т.

#### **Заключение**

Сравнительный анализ демонстрирует, что производство бумаги из макулатуры позволяет снизить затраты на энерго- и водоснабжение в 3-5 раз по сравнению с производством из первичной древесины. Столь значительная разница в ресурсоемкости подтверждает стратегическую целесообразность развития мощностей по переработке макулатуры в рамках реализации принципов циклической экономики и устойчивого развития. Кроме того, замещение одной тонны целлюлозы макулатурным сырьем позволяет

обеспечить экономию 3–4 м<sup>3</sup> древесины [1, 8]. Данный фактор способствует не только сохранению лесных ресурсов за счет сокращения объемов вырубki, но и исключает сопутствующие затраты на лесозаготовку, транспортировку сырья и лесовосстановительные мероприятия.

#### **Список литературы**

1. Ванчаков, М. В., Кулешов, А. В., Коновалова, Г. Н. Технология и оборудование для переработки макулатуры: учебное пособие / М. В. Ванчаков, А. В. Кулешов, Г. Н. Коновалова — 2-е издание, испр. и доп. — Санкт-Петербург: СПбГТУРП. СПб., 2011 Ч.1 — 99 с.
2. ГОСТ 10700-97. Макулатура бумажная и картонная. Общие технические условия. — М.: Стандартиформ, 2010. — 15 с.
3. Модернизация установок подготовки массы для снижения энергопотребления и выбросов // Журнал профессионалов целлюлозно-бумажной промышленности URL: <https://paperprof.ru/pub/modernizatsiya-ustanovok-podgotovki-massy-dlya-snizheniya-energopotrebleniya-i-vybrosov> (дата обращения: 08.11.2025).
4. Тарифы на электроэнергию для малых предприятий и ИП // TIME2SAVE URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatiy-i-ip> (дата обращения: 08.11.2025).
5. Вода в предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности // Роспайп URL: [https://rospipe.ru/tekh\\_info/tekhnicheskie-stati/vodoprovodnye-sistemy-i-oborudovanie/otraslevye-resheniya/1459/](https://rospipe.ru/tekh_info/tekhnicheskie-stati/vodoprovodnye-sistemy-i-oborudovanie/otraslevye-resheniya/1459/) (дата обращения: 08.11.2025).
6. Энергозатраты на производство материалов // Фестиваль науки URL: <https://festivalnauki.ru/media/articles/klub/energizatraty-na-proizvodstvo-materialov/> (дата обращения: 08.11.2025).
7. Водные ресурсы и загрязнение природных вод // Эколог URL: [https://ekolog.org/books/41/4\\_3.htm](https://ekolog.org/books/41/4_3.htm) (дата обращения: 08.11.2025).
8. Верхососова, А. И. Основные направления применения химических технологий в строительной отрасли / А. И. Верхососова, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. — 2024. — Т. 38, № 12(291). — С. 99-101.

УДК 533.583.2

Просветова Д.Ю., Савинков С.В.

## Анализ способов адсорбции CO<sub>2</sub> на предприятиях российского химико-технологического комплекса

Просветова Дарья Юрьевна- студент [d\\_prosvetova@mail.ru](mailto:d_prosvetova@mail.ru)

Савинков Сергей Валериевич – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва.

*В статье представлен анализ современных адсорбционных технологий улавливания диоксида углерода, применяемых на предприятиях российского химико-технологического комплекса. Рассмотрены основные типы сорбентов, их эксплуатационные характеристики и перспективы развития технологий в контексте снижения углеродных выбросов.*

*Ключевые слова:* адсорбция, CO<sub>2</sub>, цеолиты, активированные угли, металлоорганические каркасы

## Analysis of methods of CO<sub>2</sub> adsorption at enterprises of the Russian chemical and technological complex

Prosnetova D.Y., Savinkov S.V

D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia

*The article presents an analysis of modern adsorption technologies for carbon dioxide capture used at enterprises of the Russian chemical and technological complex. The main types of sorbents, their operational characteristics, and the prospects for technological development in the context of reducing carbon emissions are examined.*

*Keywords:* adsorption, CO<sub>2</sub>, zeolites, activated carbons, metal-organic frameworks.

### Введение

Проблема улавливания углекислого газа в российской промышленности становится все более острой, поскольку предприятия химико-технологического профиля заметно влияют на общий объем национальных выбросов. Согласно статистическим данным, на их долю приходится порядка 19% от общего объема эмиссии [1]. Особую актуальность проблеме придает устойчивый рост выбросов в химической отрасли, где за период с 2015 по 2022 год их объем увеличился на 35%. В данных условиях задача внедрения эффективных методов сокращения углеродного следа приобретает важное значение для обеспечения экологической устойчивости и выполнения международных климатических обязательств.

Существующие подходы к улавливанию CO<sub>2</sub> существенно различаются по принципам работы и эксплуатационным характеристикам. Эти различия определяют области их эффективного применения на реальных производствах, поэтому оценка механизмов сорбции и поведения материалов в технологических потоках представляет практический интерес.

Целью работы является проведение анализа адсорбционных технологий улавливания диоксида углерода, применяемых на предприятиях российского химико-технологического комплекса, с акцентом на их эксплуатационные, экономические и экологические особенности.

### Основная часть

Современные методы адсорбции CO<sub>2</sub>

#### 1. Адсорбция на цеолитах

Ключевым механизмом адсорбции CO<sub>2</sub> на цеолитах являются электростатические взаимодействия молекул газа с экстра-каркасными катионами и основными центрами каркаса, а высокая селективность процесса обусловлена значительным квадрупольным моментом и поляризуемостью CO<sub>2</sub> по сравнению с N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> [2]. С

техничко экономической точки зрения, регулируемость параметров каркаса, соотношения Si/Al и природы катионы позволяет оптимизировать процесс для конкретных газовых смесей, обеспечивая низкие энергозатраты на регенерацию и длительный срок службы адсорбента. Экологические преимущества технологии заключаются в отсутствии вторичных жидких отходов и использовании стабильных нетоксичных материалов, хотя чувствительность гидрофильных цеолитов к влаге требует дополнительных затрат на предварительную осушку газовых потоков.

#### 2. Адсорбция на активированных углях

Адсорбция CO<sub>2</sub> на активированных углях осуществляется за счет дисперсионных взаимодействий в развитой системе микропор, что обеспечивает высокую эффективность технологии при обработке газовых потоков с умеренной концентрацией диоксида углерода [3]. С технико-экономической точки зрения метод характеризуется низкими капитальными затратами и возможностью регенерации сорбента, однако требует тщательной предварительной осушки газов из-за высокой гидрофильности углей, что увеличивает эксплуатационные расходы. Экологические преимущества включают использование нетоксичного сорбента и отсутствие вторичных загрязнений, однако ограниченная селективность CO<sub>2</sub> в присутствии влаги и сравнительно невысокая ёмкость сорбции определяют целесообразность применения данной технологии преимущественно на начальных стадиях очистки газовых смесей.

#### 3. Аминогруппа-модифицированные сорбенты

Аминогруппы-модифицированные сорбенты осуществляют улавливание CO<sub>2</sub> за счет хемосорбции, основанной на взаимодействии диоксида углерода с основными азотсодержащими центрами с образованием карбаматов, что обеспечивает высокую селективность и рабочую емкость даже при низких парциальных

давлениях газа. [4] С технико—экономической точки зрения, метод пропитки пористых носителей является наиболее рентабельным, однако склонность к выщелачиванию аминов и их деградация ограничивают срок службы сорбента, в то время как методы ковалентной прививки и полимеризации, обеспечивающие повышенную стабильность, сопряжены с более высокими капитальными затратами и сложностью синтеза. Экологические преимущества технологии заключаются в возможности работы в мягких температурных режимах и повторного использования сорбента, однако энергоёмкость стадии регенерации (100–120 °С) и углеродный след от производства функционализированных материалов требуют тщательной оценки в рамках всего жизненного цикла для подтверждения экологической целесообразности их крупномасштабного применения.

#### 4. Металлоорганические каркасы [5]

Адсорбция CO<sub>2</sub> в металлоорганических каркасах (MOF) реализуется за счет комбинации физической сорбции в ультрапористых структурах с регулируемой химической адсорбцией на активных центрах, создаваемых подбором металлических кластеров и органических линкеров. С технико-экономической точки зрения, ключевыми преимуществами MOF являются исключительно высокая удельная поверхность и возможность атомно-точного дизайна пор для целевого разделения газов, однако высокая стоимость синтеза, чувствительность к влаге и вопросы долговременной стабильности в циклических процессах остаются основными барьерами для широкой коммерциализации. Экологическая оценка технологии противоречива: с одной стороны, она позволяет создавать высокоэффективные и регенерируемые сорбенты, но с другой — синтез MOF часто связан с использованием токсичных растворителей и высокими энергозатратами, что требует разработки более устойчивых производственных протоколов для снижения совокупного углеродного следа.

#### Перспективы развития адсорбционных технологий

Перспективы развития адсорбционных технологий связаны с переходом от традиционных сорбентов к материалам нового поколения, обладающим повышенной стабильностью и селективностью в реальных промышленных потоках. Наиболее значимым направлением считается создание гибридных систем [6], сочетающих адсорбенты с мембранными или каталитическими элементами, что позволяет снизить энергоёмкость процессов и повысить степень улавливания CO<sub>2</sub>. Существенный исследовательский интерес вызывает разработка высокотемпературных и влагостойких сорбентов, способных работать в составе интегрированных энергетических циклов. В дальнейшем ключевым фактором масштабирования технологий станет повышение их экономической эффективности за счёт удешевления синтеза материалов и оптимизации регенерационных режимов. В совокупности эти направления формируют основу для промышленного внедрения адсорбционных систем в составе низкоуглеродных энергетических и химико-технологических процессов.

#### Заключение

Проведённый анализ показывает, что адсорбционные технологии занимают значимое место среди методов улавливания диоксида углерода, применяемых в российском химико-технологическом комплексе. Рассмотренные классы сорбентов — цеолиты, активированные угли, аминотипированные материалы и металлоорганические каркасы — отличаются как механизмами связывания CO<sub>2</sub>, так и эксплуатационными характеристиками, что определяет их применимость в различных промышленных условиях. На сегодняшний день наибольший практический потенциал демонстрируют цеолитсодержащие и аминные системы, сочетающие высокую эффективность с возможностью многократной регенерации. Вместе с тем дальнейшее снижение углеродного следа промышленности требует совершенствования существующих материалов и разработки новых сорбентов, устойчивых к воздействию влаги и колебаниям технологических параметров. В совокупности полученные результаты подтверждают, что развитие адсорбционных технологий является одним из ключевых направлений формирования низкоуглеродных промышленных процессов, способных обеспечить более глубокое сокращение выбросов CO<sub>2</sub> в долгосрочной перспективе.

#### Список литературы

1. «Климатическая политика и экономика России» ИНИ РАН. – М., 2025. – 54 с.
2. Boer, D. G.; Langerak, J.; Pescarmona, P. P. Zeolites as Selective Adsorbents for CO<sub>2</sub> Separation. ACS Appl. Energy Mater. 2023, \*6\* (5), 2634–2656. <https://doi.org/10.1021/acsaem.2c03605>
3. Технология адсорбции активированного угля для очистки органических отходящих газов [Электронный ресурс] // Nature Carbon. – URL: <https://www.naturecarbon-ru.com/news/activated-carbon-adsorption-technology-for-the-79502062.html>
4. Адсорбционные технологии улавливания CO<sub>2</sub> [Электронный ресурс] // Катализ. Научно-образовательный портал. URL: <https://sciact.catalysis.ru/public/article/48871>
5. Kargen MOF. Прорывы в области материалов MOF и перспективы коммерциализации технологии DAC [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: <https://www.kargenmof.com/ru/news/breakthroughs-in-mof-materials-and-the-commercialization-prospects-of-dac-technology/> (дата обращения: 21.11.2025).
6. Гордин К. А., Синкевич М. В., Косой А. С., Попель О. С., Вендланд Л. Е. Технологии снижения выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу при использовании природного газа в теплоэнергетике // Вестник ОНВТ РАН. – 2022. – С. 1–84.
7. Мешалкин В.П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения и минимизации отходов нефтеперерабатывающих производств: основы теории и наилучшие практические результаты. М-Генуя: «Химия», 2009– 393с.
8. Кафаров В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В.В.Кафаров, В.П.Мешалкин. — М. : «Химия», 1991 — 432 с.

УДК 330.131:658.567.1:666.1

Разводов А.В., Зверева О.В., Григорьев А.Е.

## Сравнительный анализ эффективности рециклинга стеклянных отходов через систему залоговой стоимости и отдельного сбора для города Москвы

Разводов А.В. – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики,

электронная почта [razvodov.artem@mail.ru](mailto:razvodov.artem@mail.ru)

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,

электронная почта [zvereva.o.v@muctr.ru](mailto:zvereva.o.v@muctr.ru);

Григорьев Андрей Евгеньевич – бакалавр 4 курса ФГБОУ ВО Национального Исследовательского

Университета «МЭИ» института «ИРЭ» кафедры промышленной электроники,

электронная почта [napoleon04@yandex.ru](mailto:napoleon04@yandex.ru)

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье проводится экономическая оценка целесообразности внедрения двух рециклинговых подходов — системы залоговой стоимости тары и системы отдельного сбора стеклянных отходов — в Москве на десятилетнюю перспективу. На основе данных за 2023 год анализируется текущая ситуация с обращением стеклянных отходов: объёмы образования, переработки и захоронения, а также связанные с этим затраты. Рассчитаны экономические показатели для трёх сценариев: существующая ситуация (базовый сценарий), внедрение системы залоговой стоимости, улучшение системы отдельного сбора. Показано, что оба предлагаемых подхода требуют значительных первоначальных капитальных вложений, однако в долгосрочной перспективе приводят к существенной экономии средств по сравнению с базовым сценарием.*

*Ключевые слова: сравнительный анализ, залоговая стоимость, отдельный сбор, стеклоотходы, рециклинг.*

## Comparative analysis of the effectiveness of glass waste recycling through the system of pledge value and separate collection for the city of Moscow

Razvodov A.V., Zvereva O.V., Grigoriev A.E.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*The article conducts an economic assessment of the feasibility of implementing two recycling approaches — a container deposit-refund system and a separate collection system for glass waste — in Moscow over a ten-year perspective. Based on 2023 data, the current situation regarding glass waste management is analyzed: volumes of generation, recycling, and landfilling, as well as the associated costs. Economic indicators are calculated for three scenarios: the existing situation (baseline scenario), the implementation of a deposit-refund system, and the enhancement of the separate collection system. It is shown that both proposed approaches require significant initial capital investments; however, in the long term, they lead to substantial cost savings compared to the baseline scenario*

*Keywords: comparative analysis, collateral value, separate collection, glass waste, recycling.*

### Введение

Тема рециклинга стеклянных отходов становится актуальным в условиях проблем общества и экологии, связанных с увеличением объемов отходов и истощением природных ресурсов [3]. Применение стеклобоя после систем рециклинга возможно в различных направлениях деятельности, например, строительство [1, 2]. Рециклинг (вторичная переработка отходов) — это комплекс технологических процессов, направленных на возвращение отходов производства и потребления в цикл обработки для повторного использования в качестве вторичного материального или энергетического ресурса. На основании проанализированных источников литературы [1-3, 8-11] можно выделить два наиболее перспективных подхода:

1. Система залоговой стоимости тары предполагает возврат части стоимости упаковки при ее сдаче на переработку. Этот метод стимулирует потребителей к возврату использованной тары, что, в

свою очередь, увеличивает объемы собранного стекла для переработки.

2. Отдельный сбор стеклянных отходов — это подход, включающий в себя организацию сбора стеклянных отходов отдельно от других видов мусора.

В данной работе будет рассмотрена конкретная ситуация для Москвы 2023-го года. Расчет не учитывает изменение ключевой ставки, изменение уровня инфляции в стране за текущий на тот момент 2023 год и индексации зарплаты рабочих, а сам расчет показывает лишь теоретическую модель. Исходными данными будут служить данные о количестве жителей Москвы и количестве ТКО. Цель настоящей статьи — дать экономическую оценку целесообразности внедрения данных рециклинговых подходов отдельного сбора и залоговой стоимости для Москвы на десятилетнюю перспективу.

### Аналитическая часть

В Москве живут около 13,1 миллионов человек, и по данным официальных отчетов город

производит примерно 3,8 миллионов тонн твердых коммунальных отходов (ТКО) в год [6]. В динамике по сравнению с 2022 годом процент утилизации ТКО в Москве вырос на 5,8%, а захоронение всех ТКО составило 1711,0 тонн отходов [7]. Согласно основному составу ТКО, стекло составляет в среднем около 5% от этого объема. Как следствие, количество стеклянных отходов составляет  $3,8 \text{ млн т} * 0,05 = 190\,000 \text{ т}$ . Такое количество стекла ежегодно собирается только в одной Москве, из этого количества лишь 37% перерабатывается, 7% утилизируется и обеззараживается, а остальные 56% идут на захоронение. То есть из 190 000 тысяч тонн стекла идет на захоронение 106 400 тонн, а на переработку лишь 70 300 тонн.

Определив среднюю стоимость на захоронение 1 тонны стекла в 4 865, 76 рублей, суммарная стоимость захоронения составит  $4\,865,76 * 106\,400 \text{ тонн}$ , что равняется 517 716 864 руб. Эта та стоимость, которую платит Правительство Москвы, чтобы только закопать отходы в землю.

Переработка оставшейся части стеклобоя тоже стоит достаточно больших денежных средств. Мойка и сортировка переработанного стекла обойдется в 2 413, 26 рублей за 1 тонну стекла, для 70 300 тон получим сумму в 169 652 178 рублей. Добавим к этому стабильные административные и прочие операционные расходы на содержание производств по переработке в 56 млн рублей. Итого общая сумма ежегодных расходов, связанных с переработкой, обойдется приблизительно в 225 652 178 рублей.

Реализация чистого и переработанного стекла обходится по средней цене для Москвы в 1021,83 рубля за 1 тонну чистого переработанного стекла, следовательно сумма денежных средств с продажи этого стекла составит 71 834 649 рублей за 70 300 тонн. Очевидно, что обработка и переработка стекла обойдется дороже, чем его продажа, однако это необходимо чтобы поддерживать стабильный уровень экологической обстановки в Москве.

В общем итоге все доходы за год от рассматриваемой ситуации 2023 года в Москве составляют приблизительно 71 834 649 рублей с продаж переработанного стекла, а расходы составляют сумму стоимости захоронения и сумму операционных расходов в год:  $517\,716\,864 + 225\,652\,178 = 743\,369\,042 \text{ рубля}$ .

Расчет убыли обслуживания всей системы есть сумма доходов и расходов:  $71\,834\,649 - 743\,369\,042 = -671\,534\,393 \text{ рубля}$ . Это та стоимость, которую Правительство Москвы ежегодно оплачивает на полное обслуживание стеклоотходной и стеклоперерабатывающей системы за вычетом дохода с продаж.

Так как за 2023 год нет капитальных расходов, то стоимости на перспективе в 10 лет не изменятся при условии сохранения стабильного количества стекло отходов и количестве захоронения без учета изменения инфляции и т.д. и к 2033 году

составит 6 715 343 930 рублей – стоимость обслуживания сети стеклоотходов за вычетом дохода от продаж переработанного стекла за 10 лет.

Рассмотрим систему введения залоговой стоимости. Ситуацию с количеством отходов примем постоянной и равной 3,8 миллионам тонн ТКО, из которых 5% есть стеклоотходы. При залоговой стоимости можно ожидать увеличение процента переработки стеклоотходов до 49% как, например, в Нидерландах за 2013 год [3], то есть от 190 000 тонн это 93 100 тонн, а на захоронение, соответственно, будет уходит 42%, то есть 79 800 тонн стекла при условии сохранения 7% на утилизацию и обеззараживание. При тарифе в 4 865, 76 рублей за тонну получаем стоимость 388 287 648 рублей за захоронение 79 800 тонн стекла.

Так как система залоговой стоимости является новшеством, необходимо потратиться на установку необходимого оборудования и его последующей амортизацией и обслуживанием – капитальные затраты. Предварительная стоимость 1 аппарата для приёма и первичной очистки стекла и возврата денежных средств за него равняется 600 000 рублей. Если поставить 300 таких аппаратов на территории Москвы, то сумма обойдется в 180 миллионов рублей. Амортизацию, обслуживание и логистику оценим в 130 миллионов рублей, следовательно вся сумма капитальных затрат составит приблизительно 310 миллионов рублей.

Помимо капитальных затрат на установку и введение в эксплуатацию Правительство должно выделять финансирование на ежегодное обслуживание и прочие административные расходы, приблизительно 50 миллионов в год, а также стоимости обслуживания и очистки стеклотар, прошедших через аппараты системы залоговой стоимости в 1 200 рублей за 1 тонну, что в сумме составит 111 720 000 рублей за 93 100 тонн переработанного и очищенного стекла. В сумме все операционных расходы составят 161 720 000 рублей в год.

При цене в 1 021, 83 рубля за тонну чистого стекла, получается стоимость реализации готовой переработанной стеклотары в 95 132 373 рубля за 93 100 тонн.

По сравнению с ситуацией 2023 года, мы пускаем на переработку лишние 26 600 тонн стекла, а не зарываем его в землю. Следовательно, экономия составит 129 429 216 рублей при тарифе в 4 865, 76 рублей за тонну стекла.

Все ежегодные доходы составят стоимость от реализации стекла и экономии от отсутствия захоронения, получается 224 651 589 рублей, а расходы составят сумму стоимости захоронения, капитальных и операционных расходов, получается 860 007 648 рублей. Разница составит 635 446 059 рублей – это та убыль денежных средств, которое Правительство Москвы понесёт вследствие введения данной системы залоговой стоимости. В следующие годы десятилетней перспективы стоимости будет рассчитываться без капитальных затрат, так как они

единообразные, ежегодная стоимость в будущем составит 325 446 059 рублей, включая в себя лишь операционных расходы и расходы на захоронения за вычетом стабильного общего дохода.

Улучшение уже действующей с 2020 года системы раздельного сбора также будет недешёвой, но очень эффективной с экономической и экологической стороны [5]. Процент переработки стеклоотходов может быть приблизительно равным 68%, чуть больше, чем в Германии в 2013 году [3], что есть 129 200 тонн от 190 000 тонн, а процент захоронения снизиться до 23%, то есть до 43 700 тонн. При стандартной средней стоимости захоронения в 4 865, 76 рублей за тонну захоронение обойдется в 212 633 712 рублей.

Капитальные затраты составят приблизительно 300 миллионов рублей при покупке 6 000 контейнеров (синих для вторсырья) [5] для раздельного сбора, каждый стоимостью по 50 000 рублей, а установка по всей территории Москвы и последующей переналадкой уже имеющегося оборудования и утилизация прошлых контейнеров обойдется приблизительно в 150 миллионов рублей, что в сумме обойдется в 450 миллионов рублей.

Операционные расходы такая же неотъемлемая часть ежегодных трат. За мойку и переработку отсортированного стекла в стоимость 2 413, 26 рублей за тонну получается 311 793 192

рублей за 129 200 тонн стекла, а также прочие операционные и административные расходы приблизительно в 200 миллионов рублей, что в сумме даст ежегодные операционные расходы в 511 793 192 рубля.

Ежегодные доходы от отсутствия захоронения 62 700 тонн стекла, которое пошло на переработку, составит 305 083 152 рубля при тарифе в 4 865, 76 рублей за тонну. Стоимость от реализации переработанного стекла при стоимости в 1 021, 83 рубля за тонну составит 132 020 436 рублей, а суммарный ежегодных доход составит 437 103 588 рублей.

Общие расходы в первый год складываются из капитальных затрат, операционных затрат и затрат на захоронение, сумма есть 1 174 426 904 рублей, а общая убыль денежных средств в первый год составит 737 323 316 рублей от внедрения и улучшения системы раздельного сбора стеклотары. В будущем стоимость составит лишь сумму операционных затрат и затрат на захоронение, получится стабильная убыль около 287 323 316 рублей, а в перспективе на 10 лет получается стоимость 3 323 233 160 рублей, которое Правительство стабильно будет оплачивать. Все полученные данные для сравнения сведены в таблицу.

Параметр сравнения	Ситуация 2023 года	Залоговая стоимость	Раздельный сбор
Захоронение, тонн	106 400 (56%)	79 800 (42%)	43 700 (23%)
Суммарная стоимость захоронения, руб.	517 716 864	388 287 648	212 633 712
Не пошло на захоронение, тонн (от ситуации 2023 года)	0	26 600	62 700
Сэкономлено на отсутствии захоронения, руб.	0	129 429 216	305 083 152
Переработки, тонн	70 300 (37%)	93 100 (49%)	129 200 (68%)
Капитальные затраты, руб.	0	310 000 000 <sup>(б)</sup>	450 000 000 <sup>(в)</sup>
Операционные затраты, руб.	225 652 178 <sup>(а)</sup>	161 720 000 <sup>(б)</sup>	511 793 192 <sup>(д)</sup>
Стоимость реализации чистого стекла, руб.	71 834 649	95 132 373	132 020 436
Суммарный доход, руб.	71 834 649	224 561 589	437 103 588
Общий расход, руб.	743 369 042	860 007 648	1 174 426 904
Разница за первый год эксплуатации, руб.	- 671 534 393	- 635 446 059	- 737 323 316
Разница в следующие годы, руб.	- 671 534 393	- 325 446 059	- 287 323 316
Суммарная разница за 10 лет, руб.	- 6 715 343 930	- 3 564 460 590	- 3 323 233 160
Сравнение с исходной ситуацией 2023 года, руб.	0	3 150 883 340	3 392 110 770

Таблица 1. Сравнительный анализ внедрения залоговой стоимости и раздельно сбора стеклоотходов

(а) 2413,26 рублей - мойка и сортировка / 1 тонна стекла, в сумме 169 652 178 руб. + дополнительные расходы операционных затрат: на логистику, административные и непредвиденные расходы приблизительно закладывается стоимость в 56 000 000 руб., итого в сумме = 225 652 178 рублей.

(б) около 600 000 руб. / 1 аппарат, необходимо 300 аппаратов = 180 000 000 руб., + Расходы логистики, амортизации и администрирования = 130 000 000 руб., в сумме = 310 000 000 рублей.

(в) около 50 000 000 руб. на административные, непредвиденные и побочные расходы. Обслуживание аппаратов и логистика приблизительно = 1200 руб. / 1 тонна стекла, в сумме = 111 720 000 руб., общая сумма = 161 720 000 рублей.

(г) 50 000 руб. / 1 контейнер, необходимо 6000 контейнеров = 300 000 000 руб., а также стоимости переналадки, амортизации, логистики и прочих административных расходов = 150 000 000 руб., в сумме = 450 000 000 рублей.

(д) 2413,26 рублей - мойка и сортировка / 1 тонна стекла, в сумме 311 793 192 руб., административные расходы и расходы на непредвиденные ситуации приблизительно оцениваются в 200 000 000 руб., в сумме 511 793 192 рублей

Как следствие, при рассмотрении десятилетней перспективы от всех систем, мы можем сравнить их с исходной ситуацией 2023 года: при введении залоговой стоимости, Правительство экономит 3 150 883 340 рублей, а при внедрении и улучшении системы раздельно сбора экономия равна 3 392 110 770 от стоимости десятилетнего поддержания системы обслуживания стеклоотходов и их захоронении в 6 715 343 930 рублей.

### Заключение

Таким образом внедрение новых подходов систем рециклинга стеклянных отходов экономически более целесообразно и энергоэффективно, чем исходная ситуация с захоронением и переработкой в 2023 году в Москве. Для этого необходимы большие единовременные финансовые затраты на внедрение одной из приведённых систем, однако в динамике можно видеть разницу более чем в 3 миллиарда рублей. Данные подходы рециклинга не самокупаемые, однако стоимость обслуживания и поддержания стеклоперерабатывающей обслуживающей сети значительно ниже, чем стоимости обслуживания сети в динамике исходной ситуации в Москве с сохранением процентного соотношения перерабатываемой и закапываемой части отходов.

### Список литературы

1. Севостьянов А.В., Ерофеев А.В., Пашутин А.А. Утилизация и вторичное использование стеклянной тары и стеклобоя // Современное строительство и архитектура. 2023. - №3 (34) - С. 43 - 65.
2. Родионова Е.В., Арляпова П.А., Примаков А.С., Казьмина О.В. Экологическое сознание населения: рециклинг стеклобоя в городском пространстве (на примере города Томска) // Векторы благополучия: экономика и социум. 2017. - С.13 - 19.
3. Саушева О.С. Зарубежный опыт организации рециклинга // Контентус. 2016. - №11 - С. 65 - 71.
4. Баратов С.Э. Вторичная переработка стекла в России: взгляд изнутри // Наука, техника и образование. 2015. - №2 - С. 23-27.
5. Доклад о состоянии окружающей среды в Москве (ежегодное издание). - М.: Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, 2023. - С.169
6. Сведения об образовании, обработке, утилизации отходов производства и потребления за 2023 год, представленные региональными операторами и операторами, осуществляющими деятельность с твердыми коммунальными отходами – М.: Росприроднадзор. Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 2023. – С. 4
7. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». - М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2024. - С. 219 - 225.
8. Верховосова, А. И. Основные направления применения химических технологий в строительной отрасли / А. И. Верховосова, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. – 2024. – Т. 38, № 12(291). – С. 99-101. – EDN MIZKQT.
9. Композиционные материалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Е. Н. Субчева, Ю. М. Аверина, Е. В. Юртов, О. В. Зверева. – Москва : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2017. – 128 с.
10. Осипов, Г. А. Актуальные проблемы обращения с отходами в Российской Федерации / Г. А. Осипов, Ю. М. Аверина, А. С. Куценко // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Т. 37, № 4(266). – С. 158-164.
11. Ахметова, В. Н. Контроллинг на малых инновационных предприятиях / В. Н. Ахметова, Е. А. Барабанщикова, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 31, № 15(196). – С. 76-77.

УДК 631.4

Пигас А.В., Журавлева О.С.

## Цифровые инструменты управления землепользованием дерново-подзолистых почв на основе прогнозирования их плодородия

Пигас Александр Валерьевич – студент группы МТ-17 a.v.pigas@list.ru;

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; zhuravleva.o.s@muctr.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены современные цифровые методы мониторинга и прогнозирования плодородия дерново-подзолистых почв. Проведен обзор исследований по цифровому картированию, дистанционному зондированию, ГИС и моделированию почвенных свойств. Описаны методы валидации моделей (кросс-валидация,  $R^2$ , RMSE, MAE). Интеграция спутниковых и наземных данных с машинным обучением обеспечивает высокую точность прогноза ключевых параметров плодородия. Отмечена значимость ГИС и дронемерии для детального зонирования и создания локальных систем поддержки решений. Сделан вывод о потенциале цифровых технологий для управления плодородием и даны практические рекомендации: от дистанционной оценки почв до адаптивного управления удобрениями.*

*Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; цифровые технологии; ГИС; дистанционное зондирование; прогнозирование плодородия; машинное обучение; валидация модели.*

### Digital tools for managing the use of sod-podzolic soils based on predicting their fertility

Pigas A.V., Zhuravleva O.S.

*The article examines modern digital methods for monitoring and predicting the fertility of sod-podzolic soils. A review of research on digital soil mapping, remote sensing, GIS, and modeling of soil properties is conducted. Methods for validating models (cross-validation,  $R^2$ , RMSE, MAE) are described. The integration of satellite and ground data with machine learning ensures high accuracy in predicting key fertility parameters. The importance of GIS and drone surveying for detailed soil zoning and creating local decision support systems is noted. A conclusion is drawn about the potential of digital technologies for fertility management, and practical recommendations are given from remote soil assessment to adaptive fertilizer management.*

*Keywords: sod-podzolic soils; digital technology; GIS; remote sensing; fertility forecasting; machine learning; model validation.*

#### Введение

Дерново-подзолистые почвы — широко распространённый тип почв лесостепной и южно-таёжной зон России (около 6,5 % территории страны). Они характеризуются кислой реакцией и невысоким содержанием гумуса (обычно 2–6 % в гумусовом горизонте), что ограничивает их естественное плодородие. Управление землепользованием на дерново-подзолистых почвах требует эффективных методов оценки и прогнозирования плодородия для оптимизации применения удобрений и сохранения почвенных ресурсов.

В последние годы наблюдается активная цифровизация аграрного сектора. В рамках национальных стратегий создаются проекты по созданию цифровой карты почв России, развивается использование дистанционного зондирования, ГИС и машинного обучения.

По данным Шокумовой Р.Е. [1], только около 10 % сельскохозяйственных земель в России обрабатываются с привлечением цифровых технологий.

Цифровые инструменты (ГИС, беспилотные системы, смартфонные приложения и др.) позволяют интегрировать спутниковые, почвенные и метеоданные для поддержки решений агропроизводства [1,2].

Цель статьи — аналитический обзор цифровых методов и инструментов прогнозирования плодородия почв, оценка их достоинств и ограничений, а также формулирование рекомендаций по управлению землепользованием на дерново-подзолистых почвах. Задачи включают систематизацию цифровых инструментов, обзор методов прогноза агрохимических и физико-химических свойств, описание способов валидации моделей и оценочных критериев (RMSE,  $R^2$ , MAE, AUC и др.), а также анализ применимости методов.

#### Особенности дерново-подзолистых почв и проблемы плодородия

Дерново-подзолистые почвы формируются под хвойно-лиственными лесами на лесных суглинках и имеют профиль (гумусовый, элювиальный и иллювиальный горизонты) [3].

Они характеризуются низким содержанием гумуса и насыщенных оснований, часто кислые (pH 4,5–5,5) и подвержены промыванию. Их агрономические свойства невелики: биологическая активность почв низкая и коррелирует с продуктивностью культур.

Козлов А.В. и др. [4] показали связь между биологической активностью дерново-подзолистой почвы и урожайностью растений.

Для повышения плодородия требуется известкование и минеральное питание. Получение информации о пространственном распределении показателей критично для дифференцированного внесения удобрений.

#### Цифровые технологии в сельском хозяйстве

Цифровые технологии объединяют ГИС, дистанционное зондирование (ДЗЗ), беспилотные летательные аппараты (БПЛА), сенсоры и системы поддержки решений (DSS) и позволяют собирать пространственные и временные данные о состоянии почв.

По данным Шокумовой Р.Е. [1], цифровые технологии обеспечивают прирост эффективности сельского хозяйства и повышение производительности труда.

В России реализуются проекты цифровизации: образовательные порталы, хакатоны, отечественные ГИС-проекты. Государственный проект «Цифровая экономика» и работа РосАгрохимслужбы над «единой цифровой картой почв» подтверждают развитие интегрированных почвенных баз [1].

Мировые инициативы (SoilGrids, Digital Soil Map) демонстрируют значимость стандартизированных данных для моделирования экосистем и землепользования.

#### Дистанционное зондирование и геоинформационные методы

ДЗЗ и ГИС широко применяются для мониторинга пространственной изменчивости плодородия. Спутниковые индексы (NDVI, ASF, EVI и др.) используются как прокси-показатели плодородия.

Балков Е.В. и соавт. [5] показали соответствие «красных» зон ASV-индекса пониженным показателям

Таблица 1. Сравнительная характеристика цифровых инструментов управления плодородием дерново-подзолистых почв.

Инструмент	Основные функции	Требуемые данные	Ограничения	Применимость к дерново-подзолистым почвам
ГИС-платформы (ArcGIS, QGIS)	Сбор, хранение, пространственный анализ почвенных данных; создание карт, поддержка ЗУН (землеустроительных данных)	Слои почвенных карт, цифровые модели рельефа, ГЛОНАСС/GPS-координаты, результаты полевых анализов	Требуют навыков GIS-аналитиков; лицензионные расходы (для коммерч. ПО); зависимость от качества исходных данных	Широкая – универсальны для интеграции почвенных, климатических, растительных данных и планирования севооборотов
Дистанционное зондирование (спутники)	Мониторинг вегетации (NDVI, EVI, ASF), анализ влажности/температуры поверхности; выявление «проблемных» зон	Оптические/радиолокационные снимки (Sentinel-2, Landsat, MODIS); параметры вегетации, влаго- и тепловые карты	Разрешение (10–30 м) ограничивает детальность; затруднено применение под плотной растительностью/облачностью; требуется калибровка	Высокая – позволяет получать регулярную динамику растительности на больших площадях; для дерново-подзолистых часто эффективна по учету типовых градиентов влажности

плодородия. Низкое электрическое сопротивление почвы связано с увлажненными участками.

Использование БПЛА и геофизических методов позволяет детализировать карты и сократить объем классических полевых и лабораторных исследований.

Мартыненко О.В. и др. [3] описали построение ГИС-каркаса для агрохимической съёмки дерново-подзолистых почв с использованием GNSS и спутниковых снимков. Это обеспечило сбор и визуализацию данных о питательных элементах и засоренности полей [5].

#### Цифровое картирование почв и модели свойств

Digital Soil Mapping основан на статистических и геостатистических методах с использованием данных о геохимии пород, топографии, климате и ДЗЗ.

Жиголев и Савин [6] применили EVTREE для картирования земель Белгородской области.

Получена точность классификации ~87 % по Random Forest и ~59 % по EVTREE.

Платформы типа SoilGrids используют глобальные модели на основе RF и MLR. Ансамблевые методы (Random Forest, Gradient Boosting) обеспечивают высокую точность [6].

Проект «единой цифровой карты почв» России использует интерполяцию и геостатистику для заполнения пробелов между старыми картами [7].

Эти разработки формируют основу для прогностических моделей и прогнозного землепользования.

#### Типы цифровых инструментов

В Табл. 1 представлена сравнительная характеристика ГИС, методов ДЗЗ, БПЛА, почвенных сенсоров и систем поддержки решений с указанием функций, используемых данных и ограничений.

Инструмент	Основные функции	Требуемые данные	Ограничения	Применимость к дерново-подзолистым почвам
Аэрофотосъемка (БПЛА)	Высокодетальная фотограмметрия, мультиспектральные снимки полей, построение 3D-моделей рельефа	Дроны со зрительными/мультиспектральными камерами, теплоизлучательные датчики; GPS	Объем работ ограничен погодой и площадью (необходима многократная съемка); требуется подготовка оператора	Высокая – обеспечивает сверхтонкую съемку отдельных полей, выявление мелкопятности на дерново-подзолистых почвах; полезна для верификации и уточнения спутниковых карт
Почвенные сенсоры (in situ)	Измерение влажности, pH, электропроводности, содержания NPK и др. прямо в поле	Беспроводные датчики (ЕС, pH-метры, оптические измерители), станции мониторинга	Локальность замеров требует большого числа сенсоров для покрытия территории; затраты на оборудование	Средняя–высокая – для калибровки дистанционных методов и оперативного учета местных аномалий; на дерново-подзолистых почвах помогает выявить подзоленный слой
DSS и мобильные приложения (AgroSignal, Ceres и др.)	Интеграция разрозненных данных, расчёт оптимальных доз удобрений, подсказки по агротехнологиям	Результаты почвенного анализа, погодные данные, классические нормы (урожайность, технология)	Требуют ввода и периодического обновления данных; могут быть недоступны без интернета; зачастую «черный ящик» (авторы редко раскрывают алгоритмы)	Высокая – если адаптированы к региональным условиям (формам удобрений, особенностям дерново-подзолистых почв); могут существенно снизить перерасход удобрений

### Методы прогнозирования плодородия

Существуют два основных класса методов прогноза почвенных свойств: статистические (агностические) и механистические (процессные). Большинство современных исследований

сосредоточено на статистических моделях, часто с применением машинного обучения. В таблице 2 сравниваются характеристики некоторых популярных методов прогнозирования плодородия по точности и требованиям.

Таблица 2. Оценка методов прогнозирования плодородия почв.

Метод	Показатели точности	Требования к данным	Примечания
MLR (множественная регрессия)	$R^2$ обычно 0.5–0.8; RMSE и MAE зависят от разброса данных	Набор точечных полевых измерений (N, P, K, гумус, pH и др.); линейность связей	Простота интерпретации; часто даёт меньшую точность по сравнению с нелинейными моделями на сложных почвах
SVM (метод опорных векторов)	$R^2$ ~0.7–0.9 при достаточных данных; низкий RMSE	Набор точечных полевых измерений (N, P, K, гумус, pH и др.); линейность связей, плюс масштабирование данных (нормировка); гиперпараметры	Хорошо моделирует сложные зависимости; может эффективно работать на небольших выборках; медленный при больших объёмах данных
RF (случайный лес)	$R^2$ ~0.8–0.9; RMSE низкий	Большой массив обучающих данных (>1000 точек для стабильности)	Однозначно высокое качество предсказаний; нечувствителен к выбросам; «черный ящик» (ограниченная интерпретируемость)
ANN (нейросети, MLP)	$R^2$ ~0.6–0.9; RMSE низкий при хорошей настройке	Многочисленные обучающие примеры; нормировка входных параметров	Выдаёт высокую точность при правильной настройке; подвержен переобучению, требует большого выбора признаков

Метод	Показатели точности	Требования к данным	Примечания
Геостатистические методы (когеринг)	$R^2 \sim 0.4-0.7$ (по пространственной корреляции)	Координаты точек и пространственно-разреженная сетка; ковариационная модель	Учитывает пространственное автокоррелирование; результат чувствителен к однородности выборки и модельной функции
Косвенные индексы (NDVI/EVI)	$R^2 \sim 0.4-0.7$ для прогноза урожая/биомассы	Спутниковые снимки вегетационного периода по видам культуры	Простой подход, часто используемый для спутникового мониторинга; затруднения при плотной почвенной растительности; требует калибровки под локальные условия
DSS/Механистические модели (DSSAT, APSIM)	$R^2$ варьируется (зависит от качества ввода)	Подробные климатические данные, параметры семян/почв; валидация на урожайности	Учитывают законы переноса веществ и рост растений; трудозатратны в настройке и требовательны к данным

Из сравнения видно, что нелинейные методы (RF, SVM, ансамбли) показывают высокую точность при моделировании сложных почвенных свойств.

Nasir A. и др. [8] в задаче прогнозирования удельного электрического сопротивления показали преимущество SVM:  $R^2$  у SVM превысил результаты простых регрессий и PLSR, RMSE был минимальным у SVM. Kumar P. et al. [9] в задаче анализа плодородия отметили, что RF давал  $\sim 92\%$  точности предсказания содержания основных элементов (N, P, K и др.). Нейросетевые модели (MLP, LSTM) показали хорошие результаты для выбора культур (высокая точность и F1-score). Валидация моделей осуществляется с помощью перекрёстной проверки (k-fold CV), разделения на обучающие и тестовые выборки и измерения метрик (RMSE,  $R^2$ , MAE; для классификации — AUC, F1, LogLoss). В ArcGIS AutoML по умолчанию для регрессии используется RMSE и  $R^2$ .

При сравнении моделей оцениваются Residual Prediction Deviation (RPD) и коэффициент корреляции Спирмена. В работах по цифровому картированию почв приводят ассурасу и Карра для картировки классов почв [8-13].

Накопленный опыт демонстрирует преимущества цифровых методов в управлении плодородием дерново-подзолистых почв: точное картирование (ГИС, DSM), регулярный мониторинг (ДЗЗ, БПЛА) и быстрое прогнозирование (ML-модели). Технологии снижают неопределённость при оптимизации норм удобрений. Интеграция данных NDVI и ЕС в ГИС-карты помогает выявлять зоны дефицита элементов и влаги [12].

Анализ показал, что объединение спектральных, почвенных и топографических данных и использование ансамблевых моделей даёт наивысшее качество карт плодородия [13].

Ограничения связаны с качеством и доступностью данных: на малых масштабах недостаёт репрезентативных полевых измерений.

Плохая плотность почвенных проб снижает точность интерполяции и ML-предсказания [14].

Влияние растительности и сезонности усложняет применение спутниковых индексов: без очистки снимков модели могут давать искажённые результаты. Winzeler et al. указывают, что маскирование иногда критично. Многие ML-модели не учитывают специфику дерново-подзолистых почв, что вызывает систематические ошибки. Проблема валидации и интерпретации моделей сохраняется: алгоритмы «чёрного ящика» затрудняют выявление физических причин различий в плодородии. Используются RMSE и  $R^2$ , однако они зависят от масштабов. Альтернативные показатели (RPD, корреляция Спирмена, AUC) дают более контекстную оценку. Внедрение цифровых систем ограничивают социально-организационные факторы: потребность в кадрах и готовность инвестировать. По данным Шокумовой Р.Е. [1], лишь малый процент сельхозпроизводителей применяет цифровые решения.

Научные учреждения и государство должны обеспечивать поддержку фермеров.

#### Выводы и рекомендации

Цифровые инструменты доказали эффективность для оценки и прогноза плодородия почв. Интеграция растровых и точечных данных позволяет создавать точные карты и выявлять факторы ограничения урожая. Лучшие метрики демонстрируют ансамблевые ML-модели (Random Forest, градиентный бустинг).

Для дерново-подзолистых почв перспективны комбинированные подходы: дистанционный мониторинг и наземные сенсоры.

#### Рекомендации:

1. Внедрять дистанционный мониторинг полей и анализировать индексы NDVI, ASF и данные БПЛА;
2. Использовать ГИС для зонирования и оптимизации агрохимических анализов;
3. Применять локальные ML-модели (RF, SVM) с тщательной валидацией;

4. Интегрировать цифровые платформы и мобильные DSS, адаптированные к региональным условиям;

5. Развивать обучение агрономов и проводить регулярную верификацию цифровых прогнозов.

В совокупности меры повышают точность управления плодородием и устойчивость земледелия в нечернозёмной зоне.

#### Список литературы

1. Шокумова Р.Е. Цифровая трансформация сельского хозяйства региона: Digital Transformation of Agriculture in the Region / Известия Кабардино-Балкарского ГАУ. 2021. № 1 (46). С. 23–28.

2. РосАгрохимслужба. Создание единой цифровой карты почв России (23.09.2025) // Новости РФПИиДР. 2025. URL: <https://ecfs.msu.ru/news/sozдание-edinoj-cifrovoj-kartyi-pochv-rossii>.

3. Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Югай Е.С. и др. Использование ГИС для агрохимической характеристики почв и засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебно-опытного лесхоза / Бюлл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. № 99. С. 5–20.

4. Козлов А.В., Куликова А.Х., Уромова И.П. Биологическая активность дерново-подзолистой почвы и продуктивность агрофитоценозов в зависимости от применения высококремнистых пород / Регион. геосистемы. 2017. № 2. С. 140–151

5. Балков Е.В., Барсуков П.А., Шалагинов А.Е. и др. Внутрипольное зонирование почвенного покрова по данным геофизических методов / Почвы и окр. среда. 2025. Т. 8, № 3. С. 1–10.

6. Zhogolev A.V., Savin I.Y. Soil mapping based on globally optimal decision trees and digital imitations of traditional approaches / ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2020. Vol. 9, Iss. 11, p. 664.

7. Карминов В.Н., Мартыненко О.В., Онтиков П.В., Баранenkova А.А., Минаков Н.М. Цифровое картографирование лесных почв // Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование. Материалы

международной научно-практической конференции, посвященной 85- летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения В.С. Аношко. 2018. С. 162–167.

8. Nasir A., Otom M., Efremov A. et al. Modeling of soil electrical conductivity using remotely sensed data and machine learning for sustainable land management / Agra. Vestn. Urala. 2025. Vol. 33, № 3. С. 45–55.

9. Kumar P., Anwar F., Suthar S., et al. Real-time soil fertility analysis, crop prediction, and insights using machine learning and deep learning algorithms / Frontiers in Soil Sci. 2025. Vol. 2. Article 1652058.

10. Мазиров М.А., Корчагин А.А. Сорные растения и меры борьбы с ними (учебная полевая практика). Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 28 с.

11. Максимова А.Н., Мартыненко О.В., Карминов В.Н., Онтиков П.В., Минаков Н.М. Возможности ГИС-технологий для рационального использования лесных почв // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 1. С. 112–117.

12. Шанцер И.А. Растения средней полосы Европейской России. Полевой атлас. М.: Т-во научных изданий КМК. 2007. 470 с.

13. Щепашенко Д.Г., Карминов В.Н., Мартыненко О.В., Щепашенко М.В. Опыт совместного анализа материалов полевой почвенной съемки и данных лесоустройства на примере Щелковского УОЛХ // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2007. № 7. С. 47–49.

14. Югай Е.С., Мутыгуллин И.Р., Новиков А.В., Королькова И.О., Кузичев М.В., Саблин Г.Р., Кузнецов Б.А., Илюшкин И.С., Мальшев Д.А., Мартусова Г.А., Афанасьева Т.К., Мартыненко А.С. Определение засоренности полей Гребневского питомника Щелковского учебноопытного лесхоза // Сборник трудов Международной молодежной научной конференции “Генетическая и агрономическая оценка почв”. Международная молодежная научная конференция 3-и Вильямсовские чтения РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева. 2018. С. 87–88.

УДК 66.082

Разводов А.В., Зверева О.В.

## Освоение метода производства высокочистого изопропилового спирта

Разводов А.В – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики, электронная почта [razvodov.artem@mail.ru](mailto:razvodov.artem@mail.ru)

Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики, электронная почта [zvereva.o.v@muctr.ru](mailto:zvereva.o.v@muctr.ru);

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассматривается технология очистки изопропилового спирта особо чистого (11-5 ОП-1) в особо чистый с повышением до квалификации 35-8. Проанализирована техническая документация, технический регламент и нормативно-правовая документация в виде ГОСТов, ГОСТов Р и Федеральных законов Российской Федерации. Описан процесс очистки изопропилового спирта в две стадии: первая - ректификация, вторая - ламинарная дистилляция («саббойлинг»).*

*Ключевые слова: саббойлинг, очистка, изопропиловый спирт*

## Development of a method for producing high-purity isopropyl alcohol

Razvodov A.V., Zvereva O.V.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*The article discusses the technology of purification of isopropyl alcohol of extra-pure (11-5 OP-1) in extra-pure with raising to qualification 35-8. The technical documentation, technical regulations and regulatory documentation in the form of GOST, GOST R and Federal Laws of the Russian Federation is analyzed. The process of purification of isopropyl alcohol in two stages is described: the first - rectification, the second - laminar distillation ("subboiling").*

*Keywords: subboiling, purification, isopropyl alcohol*

### Введение

Производство высокочистого изопропилового спирта (ИПС ос.ч. 35-8) является важным направлением в химической промышленности, особенно для аналитической химии, микроэлектроники, фармацевтики и других высокотехнологичных отраслей, где требуются растворители с минимальным содержанием примесей. В связи с этим освоение методов его очистки представляет собой актуальную научно-техническую задачу [1].

ИПС «ос.ч. 11-5 ОП-1» – особо чистый изопропиловый спирт с массовой долей основного вещества не менее 99,8 % и содержанием примесей элементов на уровне  $2 \cdot 10^{-7}$  –  $5 \cdot 10^{-7}$  [2].

ИПС «ос.ч. 35-8» – высокочистый изопропиловый спирт, с массовой долей основного вещества не менее 99,99 % и содержанием примесей элементов на уровне  $1 \cdot 10^{-8}$ .

Технологический процесс производства высокочистого ИПС для микроэлектроники состоит из следующих двух основных технологических стадий:

- 1) ректификация исходного сырья (изопропилового спирта «ос.ч. 11-5 ОП-1») с получением изопропилового спирта ос.ч. 13-5 для оптоэлектроники;
- 2) ламинарная дистилляция (саббойлинг) ректифицированного изопропилового спирта с получением изопропилового спирта с заданным содержанием микрочастиц.

Таким образом цель настоящей статьи – дать характеристику процессам очистки, конечным продуктом которой является вышеописанный высокочистый ИПС.

### Экспериментальная часть

Исходное сырьё, ИПС «ос.ч. 11-5 ОП-1», - изопропанол особой чистоты (ос.ч.) с маркировкой 11-5, что указывает на количество контролируемых примесей (11) и ОП-1 - специальную марку для особых производственных нужд, соответствующую строгим требованиям по содержанию органических примесей [2].

Первая стадия – ректификация. Процесс ректификации является первой стадией очистки изопропилового спирта. Он проводится на лабораторной установке (рис. 1), центральным элементом которой является насадочная ректификационная колонна из термостойкого стекла высотой насадочной части 1000 мм и диаметром 50 мм. Колонна заполнена спирально-призматической насадкой из нержавеющей стали, которая создает большую поверхность контакта между паром и жидкостью, что необходимо для эффективного разделения компонентов. Перед началом работы установка проходит обязательную подготовку, которая включает проверку на герметичность инертным газом под давлением 1 атмосфера высокой чистоты (азота с содержанием основного вещества не менее 99,998%), создающим защитную атмосферу в аппаратах дистилляции и системах хранения, поддерживая остаточное содержание кислорода не

более 0,001%, что позволяет не только снизить риск образования взрывоопасных смесей, но и предотвратить окисление продукта [4, 6].

Технологический цикл начинается с загрузки 4,5 литров исходного сырья – ИПС «ос.ч. 11-5 ОП-1» – в кубовый испаритель объемом 6 литров. Загрузка осуществляется с использованием специальной оборотной тары из темного стекла, чтобы минимизировать риск загрязнения [5]. После загрузки включается система охлаждения конденсатора, который представляет собой змеевиковый теплообменник, и начинается нагрев куба. Температуру в кубе постепенно поднимают до диапазона 82–88°C, что соответствует температуре кипения ИПС.

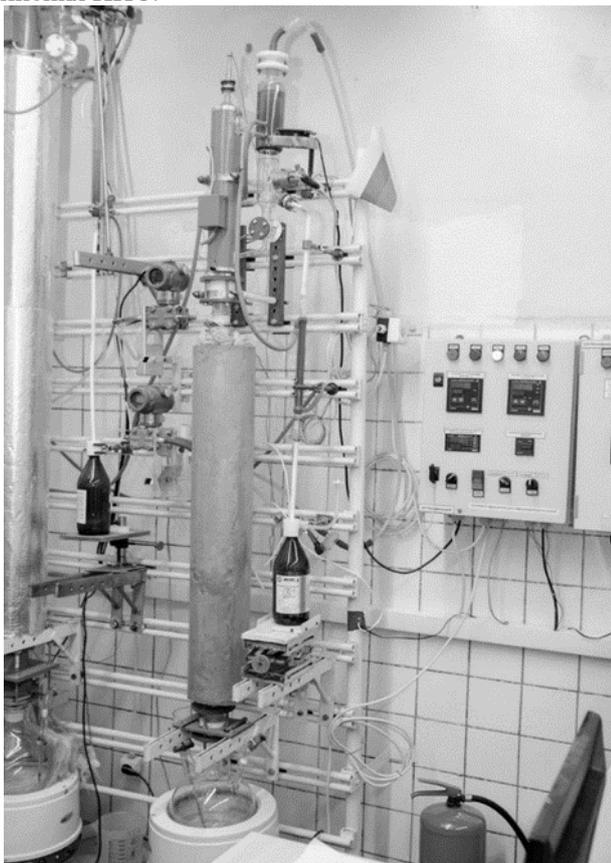


Рис. 1. Лабораторная ректификационная установка.

Следующим важным этапом является работа колонны «на себя», которая длится от 1,2 до 1,5 часов. В этом режиме отбор дистиллята не производится, а пары, поднимаясь по колонне, конденсируются в дефлегматоре и стекают обратно вниз. Это позволяет стабилизировать температурный профиль по всей высоте колонны и создать условия для максимально эффективного разделения легколетучих примесей от целевого продукта. После стабилизации начинается отбор фракций. Сначала при флегмовом числе 15 и температуре 81–82,4°C отбирается предгон, содержащий наиболее легколетучие примеси. Затем переходят к отбору целевой фракции изопропанола, при этом флегмовое число плавно повышают с 2 до 5 для качества отбора. Весь процесс занимает около 8 часов, и за это время производится до 2 литров ректификата, который затем направляется на следующую стадию очистки. После завершения

отбора система охлаждается, продукт сливается, а кубовые остатки, содержащие тяжелые примеси, отправляются на утилизацию или переработку.

Вторая стадия очистки – это ламинарная дистилляция (саббойлинг). Проводится для достижения исключительной чистоты продукта до 99,99%. Её принципиальное отличие от традиционной перегонки заключается в отсутствии стадии кипения жидкости, что позволяет избежать захвата механических примесей и минимизировать термическое разложение продукта.

Центром установки является уникальный испарительно-конденсационный узел, полностью выполненный из чистого кварцевого стекла. Перед началом работы установка также проверяется на герметичность с помощью процесса заполнения её деионизованной водой типа I по ASTM D1193-06(2011) (удельная электрическая проводимость не более 0,056 мкСм/см) и визуального контроля в течение 30 минут [3].

После проверки в систему загружается до 20 литров ректифицированного изопропанола, полученного на предыдущей стадии. Подача полупродукта осуществляется с помощью специального дозирующего насоса с проточной частью из химически стойкого перфторалкоксисополимера, а уровень жидкости в кубе-испарителе объемом 8 литров точно контролируется индуктивным датчиком. Нагрев сырья происходит не за счет стандартного кипячения, а с помощью трех инфракрасных ламп, которые точно воздействуют на жидкость. Это позволяет осуществлять контролируемое испарение только с поверхности жидкости, без образования пузырьков пара. Мощность нагрева устанавливается на уровне 20–30% от максимальной. Пары изопропанола поднимаются по кварцевому паропроводу и попадают в змеевиковый конденсатор, где охлаждаются проточной водой с расходом в 2,5–3,0 литра в минуту.

Сконденсированный дистиллят есть высокочистый изопропиловый спирт, который непрерывно отбирается. Скорость отбора целевой фракции составляет примерно 1,3 литра в час. Весь процесс максимально автоматизирован: система сама поддерживает уровень сырья и контролирует параметры теплообмена. В ходе дистилляции периодически отбираются пробы для анализа на содержание прочих примесей элементов, воды, органических примесей и микрочастиц.



Рис. 2. Лабораторная установка беспузырьковой дистилляции

### Заключение

Таким образом, исходный ИПС с массовым содержанием основного компонента 99,8% превращается в готовый высокочистый продукт с соответствующими характеристиками и массовой доли основного вещества представленных в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики готового ИПС ос.ч. 35-8

Наименование характеристики	Норма
Массовая доля основного вещества, не менее, %	99,99
Содержание воды, %, не более	0,01

Саббойлинг в отличие от традиционной перегонки заключается в отсутствии стадии кипения жидкости, что позволяет получить из изопропилового спирта особо чистого (11-5 ОП-1) высокочистый продукт с повышением до квалификации 35-8. Готовый продукт можно использовать в микроэлектронике, фармацевтики и других высокотехнологичных отраслей промышленности, где требуются растворители с минимальным содержанием примесей, в качестве одного из важнейших компонентов производственного цикла.

### Список литературы

1. Кузьмина А. И. Оптимизация процессов перапарации и нанофльтрации путем создания новых полимерных мембран, модифицированных металлорганическими каркасными структурами: дис. хим. наук: 1.4.2. . - СПб., 2021. - 295 с.
2. ТУ 2632-064-44493179-01 с изм. 1, 2 «Изопропиловый спирт особой чистоты (ос.ч) 11-5 ОП-1»
3. Сафонова Д. А. Специальные технологии подготовки деионизованной воды. Особенности проектирования и методы оптимизации // НАНОИНДУСТРИЯ. - 2021. - С. 593-596.
4. Вендило А.Г., Трохин В.Е. Универсальная установка для очистки ректификацией растворителей, относящихся к основным классам органических растворителей, и способы очистки ректификацией на ней ацетона, изопропилового спирта, бензола, толуола, н-бутанола, изобутанола, этилацетата, н-бутилацетата и циклогексана // патент на изобретение. - RU 2264840 С1, 2005. - С. 23.
5. ГОСТ 3885-73 Реактивы и особо чистые вещества. Правила приемки, отбор проб, фасовка, упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. (с Изменениями N 1, 2, 3, 4, 5)
6. ГОСТ 9293-74 Азот газообразный и жидкий. Технические условия. (с Изменениями N 1, 2, 3, с Поправками N 1, 2)

УДК

Савинков С.В., Азарова Ю.А.

## Анализ современных методов производства полиэтилена с учётом рекомендаций справочников НДТ

Азарова Юлия Александровна – студент; juliaazarovaA@gmail.com.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва.

*Статья посвящена проведению анализа современных методов производства полиэтилена различных марок на основе справочника ИТС 32-2022 «Производство полимеров, в том числе биоразлагаемые». В работе проведён анализ современных методов производства полиэтилена различных марок с рассмотрением наилучших доступных технологий, чему уделено особое внимание в данной работе, так как в промышленности наблюдаются тенденции к минимизации отходов, снижению энергопотребления и экологической оптимизации производств.*

*Ключевые слова: полиэтилен, полимеризация, наилучшие доступные технологии, энергозатраты, отходы производства, зелёная химия.*

## Analysis of modern methods for producing polyethylene taking into account the recommendations of the reference book ITS 32-2022 "Production of polymers, including biodegradable ones"

Savinkov S.V., Azarova J.A.

D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia.

*This article is dedicated to the analysis of modern methods for producing polyethylene of various grades based on the reference book ITS 32-2022 «Production of Polymers, Including Biodegradable Ones». The study analyzes modern methods for producing polyethylene of various grades, with consideration of the best available technologies, to which special attention is paid in this work, as the industry shows trends toward minimizing waste, reducing energy consumption, and environmental optimization of production processes.*

*Keywords: Polyethylene, polymerization, best available technologies, energy costs, production waste, green chemistry.*

### Введение

Полиэтилен является одним из важнейших полимеров для различных секторов экономики. Он используется практически во всех сферах от строительства до медицины благодаря тому, что имеет различные марки и, следовательно, разные свойства, подходящие для этих областей. Спрос на полиэтилен растёт, открывая новые горизонты для его применения. Но, как и любое промышленное производство, синтез полиэтилена сопровождается образованием отходов. В связи с современными тенденциями упора на энергосберегающие химические производства, необходимо уменьшать количество отходов или нейтрализовать их влияние на окружающую среду, то есть улавливать их.

Целью работы является анализ современных методов производства полиэтилена различных марок на базе нормативного документа «ИТС 32-2022 ПРОИЗВОДСТВО ПОЛИМЕРОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ БИОРАЗЛАГАЕМЫХ», поскольку в нём разобраны наилучшие доступные технологии (НДТ) для производства полиэтилена. Также важны принципы зелёной химии и политики обращения с отходами, изложенные в этом документе. Мировой объём производства полиэтилена превышает 100 млн тонн в год, что подчёркивает актуальность оптимизации процессов. [1]

### Основная часть

Полиэтилен различных марок имеет разные свойства, каждое из которых находит применение в современных сегментах экономики мира. Благодаря особым свойствам различают следующие основные марки ПЭ:

HDPE (ПЭВП) – полиэтилен высокой плотности (низкого давления) с плотностью более 0,94 г/см<sup>3</sup>. Производится методами низкого давления, обладает высокой плотностью и прочностью, используется для создания труб, плёнок и контейнеров. [2]

LDPE (ПЭНП) – полиэтилен низкой плотности (высокого давления) с плотностью до 0,94 г/см<sup>3</sup>. Получается в процессах высокого давления, в трубчатых или автоклавных реакторах, характеризуется гибкостью, применяется в производстве плёнок, пакетов и покрытий. [3]

LLDPE (ЛПЭНП) – линейный полиэтилен низкой плотности (с плотностью до 0,94 г/см<sup>3</sup>). Производится в газофазных процессах или процессах высокого давления, имеет линейную структуру, что обеспечивает лучшую прочность на растяжение по сравнению с ПЭНД. Часто применяется в производстве упаковочных материалов, в строительной сфере и плёнок.

mLLDPE, MPE – металлоценовый линейный полиэтилен низкой плотности (с плотностью до 0,94 г/см<sup>3</sup>). Получается при использовании металлоценовых катализаторов в газофазных процессах. Обладает улучшенными свойствами, такими как повышенная эластичность и прозрачность, по сравнению с другими марками. Применяется в производстве плёнок, упаковочных материалов, а также в строительной и медицинской сферах.

MDPE (ПЭСР) – полиэтилен средней плотности (плотность 0,926–0,94 г/см<sup>3</sup>). Производится газофазным методом и имеет сбалансированные свойства, схожие с полиэтиленом

низкой и высокой плотности, такие как прочность и износостойкость. Применяется в производстве упаковочных материалов, в автомобильной промышленности, для производства топливных баков и электроизоляции.

HMWPE, VHMWPE – полиэтилен высокой молекулярной массы. Имеет различные показатели плотности, производится в процессах высокого давления или газофазных. Отличается высокой прочностью и износостойкостью. Часто применяется в машиностроении, строительстве, пищевой и медицинской областях промышленности.

UHMWPE (СВМПЭ) – сверхвысокомолекулярный полиэтилен. Производится в суспензионных процессах или процессах высокого давления с использованием катализаторов Циглера–Натта. Используется в получении деталей, требующих высокой устойчивости к износу, таких как протезы и конвейерные ленты. Применяется в машиностроении, в медицинской сфере, а также в судостроении. [4]

Другие специализированные марки включают EPE – вспенивающийся полиэтилен. Этот материал характеризуется прочностью, упругостью, эластичностью и небольшой массой, обладает низкой теплопроводностью. Применяется в сфере строительства, упаковочных материалов, машиностроении и автомобилестроении, а также в медицине.

PEС – хлорированный полиэтилен. Обладает повышенной прочностью и долговечностью, хорошей химической устойчивостью, устойчив к воздействию влаги и достаточно эластичен. Его свойства находят применение в роли модификатора ударопрочности в жёстких ПВХ-изделиях, как добавка в производстве антикоррозийных красок, лаков и покрытий. Применяется также в производстве оболочек кабелей и уплотнителей.

Современные методы производства полиэтилена прекрасно описаны в справочнике ИТС 32-2022 с точки зрения высокоэффективных процессов, ориентированных на минимизацию отходов и снижение энергопотребления.

Процессы высокого давления включают производство в трубчатом реакторе, где происходит компрессия этилена, инициация полимеризации и охлаждение. Эффективность зависит от типа

реакторов. Этот способ подходит для производства не только ПЭНД, но и ЛПЭНП. Как наилучшие доступные технологии выделяются закрытые системы охлаждения для снижения водопотребления и внедрение систем рециклинга мономеров. Автоклавные реакторы проводят процесс в реакторе с перемешиванием, подходят для ПЭНД и сополимеров. Для повышения эффективности используются органические инициаторы для равномерной полимеризации и системы фильтрации выбросов.

Газофазная полимеризация осуществляется в реакторах с псевдооживленным слоем, применяется для производства ПЭВД, ПЭСР и ЛПЭНП, часто в конфигурации одного или двух реакторов. Технология включает полимеризацию этилена в газовой фазе с катализаторами, такими как Циглера–Натта или металлоценовыми, при низком давлении (10–40 бар) и температуре 70–110°C. Оборудование включает реакторы с псевдооживленным слоем, компрессоры для рецикла газа и системы удаления тепла. Эмиссии в окружающую среду включают диоксид азота 0,047 кг/т, этилен 0,7 кг/т, оксид углерода 0,43 кг/т и парниковые газы 9,0 кг/т. Как наилучшие доступные технологии выделяются внедрение режима конденсации для отвода тепла и системы рециклинга газов. [1]

Суспензионная (жидкофазная) полимеризация производится в суспензии, в инертном растворителе, например, изобутане. Чаще всего применяется для производства ПЭНД. Технология подразумевает полимеризацию в жидкой среде с катализаторами при давлении 5–30 бар и температуре 80–100°C, с контролем размера частиц. Оборудование включает петлевые реакторы, сепараторы и системы деволатилизации. Эмиссии включают оксид углерода до 0,164 кг/т, этилен до 0,058 кг/т, взвешенные вещества до 0,072 кг/т и парниковые газы 8,3 кг/т. Как наилучшие доступные технологии выделяются внедрение системы рециклинга растворителя, системы контроля размера частиц и деволатилизация. [1, 5]

Затраты на производство и уровень образовавшихся отходов имеют прямое значение для анализа наилучших технологий. В таблице 1 представлены данные по энергозатратам и отходам производства полиэтилена различными способами. [1]

Показатель	Трубчатый реактор, процесс высокого давления	Автоклавный реактор, процесс высокого давления	Газофазная технология	Суспензионная технология
Энергозатраты, кВт·ч/т	790–1197	846–1300	160–723,4	323,5–374,6
Основные выбросы	Взвешенные вещества 0,044; Этилен 3,52	Этилен 4,6; Полиэтилен 0,32; Насыщенные углеводороды C1–C5 до 0,31	Диоксид азота 0,047; Этилен 0,7; Оксид углерода 0,43; Парниковые газы 9,0	Оксид углерода до 0,164; Этилен до 0,058; Взвешенные вещества до 0,072; Парниковые газы 8,3
Основные сбросы	Взвешенные вещества 0,31; ХПК 0,54	Нефтепродукты до 0,032; ХПК до 1,85	Взвешенные вещества 0,1; ХПК 0,15	Взвешенные вещества 0,6; ХПК 1,42

Современные тенденции развития производств делают огромный акцент на энерго- и ресурсосбережении, и производство полиэтилена не исключение. Справочные данные рекомендуют перечень НДТ, которые затрагивают внедрение системы экологического менеджмента, минимизацию выбросов в атмосферу, оптимизацию водопотребления и водоотведения, управление отходами, потребление сырья и работу катализаторов, а также повышение энергоэффективности и организационно-технические аспекты.

Для процесса высокого давления в трубчатом реакторе характерны высокие значения энергопотребления и значительные выбросы этилена, поэтому наиболее удачными будут:

- НДТ 26: «Снижение потребления энергоресурсов путём использования вторичных энергоресурсов: тепла отходящих газов и низкопотенциального пара»;
- НДТ 28: «Внедрение мероприятий по снижению удельного потребления энергии»;
- НДТ 3: «Сбор и использование побочных газообразных продуктов в качестве топлива»;
- НДТ 12: «Оптимизация процессов водопотребления и организация водооборотных систем». [1]

Для процесса высокого давления в автоклавном реакторе подойдут:

- НДТ 29: «Повышение уровня автоматизации, направленное на энергосбережение»;
- НДТ 21: «Увеличение времени работы катализаторов, обеспечение высокой степени конверсии сырья»;
- НДТ 4: «Использование "сухих" методов очистки отходящих газов от пыли, применение циклонов и рукавных фильтров»;
- НДТ 13: «Обеспечение надлежащей очистки сточных вод на собственных очистных сооружениях». [1]

Для газофазной технологии предпочтительными будут:

- НДТ 11: «Внедрение более современных установок утилизации газовых выбросов»;
- НДТ 7: «Мониторинг выбросов маркерных загрязняющих веществ»;
- НДТ 17: «Оптимизация системы обращения с отходами»;
- НДТ 26: «Снижение потребления энергоресурсов путем использования вторичных энергоресурсов»;
- НДТ 31: «Модернизация автоматизированных систем управления технологическим процессом». [1]

Для суспензионной технологии отлично подойдут:

- НДТ 20: «Передача твердых отходов на утилизацию организациям с лицензией»;
- НДТ 12: «Оптимизация процессов водопотребления и организация водооборотных систем»;
- НДТ 28: «Внедрение мероприятий по снижению удельного потребления энергии»;
- НДТ 10: «Контроль и автоматизация стадий технологического процесса»;
- НДТ 21: «Увеличение времени работы катализаторов». [1]

Все эти технологии могут применяться к различным методам, но указанные наиболее эффективны для конкретных.

### Заключение

В ходе анализа современных методов производства полиэтилена различных марок на базе ИТС 32-2022 было установлено, что процессы высокого давления, газофазная и суспензионная полимеризация имеют свои преимущества и недостатки в плане энергоэффективности, эмиссий и применимости к разным маркам ПЭ. Газофазный и суспензионный методы выделяются как наиболее перспективные благодаря более низким энергозатратам и возможности интеграции НДТ для минимизации отходов и выбросов, таких как рециклинг газов и растворителей. Внедрение рекомендованных НДТ позволит не только снизить экологическую нагрузку, но и повысить экономическую эффективность производства, особенно в условиях растущего глобального спроса на полиэтилен. Для России это особенно актуально, учитывая необходимость модернизации существующих мощностей и перехода к принципам зелёной химии, что в долгосрочной перспективе обеспечит конкурентоспособность отрасли.

### Список литературы

1. ИТС 32-2022. Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых: справочник наилучших доступных технологий / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). – Москва: [б. и.], 2022. – 609 с.
2. Поляков, А. Р. Полиэтилен высокого давления. Научно-технические основы промышленного синтеза / А. Р. Поляков, Ф. И. Дунтов. – Ленинград: Химия, 1988. – 202 с.
3. Технология производства полиэтилена и полипропилена. – Москва: Химия, 1979. – 320 с.
4. Грасси, Н. Деструкция и стабилизация полимеров / Н. Грасси, Дж. Скотт. – Москва: Мир, 1988. – 246 с.
5. Химическая технология производства полиолефинов: учеб. пособие. – Владимир: Владимирский гос. ун-т, 2016. – 150 с.

УДК 678.5

Вольных М.Н., Зверева О.В.

### Сравнительный анализ технологий рециклинга полимерных отходов

Вольных Мария Николаевна – бакалавр 4 курса кафедры логистики и экономической информатики;  
Зверева Ольга Владимировна – ассистент кафедры логистики и экономической информатики,  
zvereva.o.v@muctr.ru;  
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,  
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье представлен сравнительный анализ двух основных направлений переработки пластиковых отходов: механического и химического рециклинга. Дана краткая технологическая характеристика каждого метода, на основе ключевых технологических, экономических и экологических параметров, на основании которых составлена обобщающая сравнительная таблица. Анализ показывает, что эти методы не являются взаимозаменяемыми, а служат для решения различных задач в рамках комплексной системы управления отходами. Механический рециклинг эффективен для чистых однородных фракций, в то время как химические методы позволяют вовлечь в оборот сложные и загрязненные материалы, обеспечивая переход к циркулярной экономике.*

*Ключевые слова: рециклинг пластика, механическая переработка, химическая переработка, пиролиз, деполимеризация, сравнительный анализ.*

### Comparative analysis of polymer waste recycling technologies

Vol'nyh M.N., Zvereva O.V.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*The article presents a systematic comparative analysis of the two main directions of plastic waste processing: mechanical and chemical recycling. A brief technological description of each method is given, and a comprehensive comparison table is compiled based on key technological, economic, and environmental parameters. The analysis shows that these methods are not interchangeable but serve to solve different tasks within an integrated waste management system. Mechanical recycling is effective for clean, homogeneous fractions, while chemical methods allow for the involvement of complex and contaminated materials in the production cycle, ensuring a transition to a circular economy. Keywords: plastic recycling, mechanical recycling, chemical recycling, pyrolysis, depolymerization, comparative analysis.*

#### Введение

Нарастающие объемы образования пластиковых отходов и их устойчивое накопление в окружающей среде обуславливают острую необходимость развития эффективных технологий переработки. Среди всего спектра методов рециклинга именно механический и химический подходы рассматриваются как ключевые для перехода к циркулярной экономике, так как они направлены на сохранение материальных ресурсов, в отличие от термического уничтожения с получением энергии. Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа этих двух технологических направлений для выявления их областей эффективного применения и взаимодополняемости, необходимых для дальнейшей разработки технологий для более эффективного сбора, сортировки, разделения и переработки многослойных упаковочных материалов, поскольку они представляют собой растущее количество постпотребительских и постпромышленных пластиковых отходов [1, 7-9].

#### Характеристика методов рециклинга

**Механический рециклинг.** Данный метод представляет собой совокупность физических операций, не

затрагивающих химическую структуру полимера. Стандартный технологический цикл включает:

- Сбор и сортировку: разделение отходов по типам полимеров (ПЭТ, ПНД, ПВД и др.).
- Измельчение: дробление исходного материала в крошку (флекс).
- Мойку и сушку: удаление загрязнений, этикеток и клеев.
- Агломерацию и грануляцию: термомеханическую обработку в экструдере с получением однородного регранулята.

К механическому рециклингу также относят и более сложные физико-химические процессы, такие как растворение-осаждение, используемые для сепарации компонентов многослойных материалов. Ключевое преимущество метода — относительная энергоэффективность [2].

**Химический рециклинг.** Этот метод основан на глубокой деструкции макромолекул полимера под воздействием температуры, катализаторов и химических реагентов до низкомолекулярных продуктов. Основные направления:

- Деполимеризация: направленное расщепление до исходных мономеров. Наиболее развиты процессы гликолиза и метанолиза для ПЭТ, а также термокаталитическая деполимеризация полилактида.

• Пиролиз: термическое разложение в бескислородной среде при температурах 400–800°C. Применяется в основном для полиолефинов (ПЭ, ПП), позволяет получать синтетическую нефть (пиролизное масло), горючие газы и технический углерод.

• Газификация: частичное окисление при высоких температурах с получением синтез-газа.

Главное достоинство химического рециклинга — способность перерабатывать смешанные и

загрязненные потоки отходов, непригодные для механического метода [3,4].

#### Сравнительная оценка

*Количественная оценка эффективности методов.* Для углубленного сравнения методов рециклинга был проведен анализ количественных показателей (табл. 1), основанный на данных технологических отчетов и научных публикаций [5,6].

Таблица 1. Сравнительный анализ количественных показателей эффективности.

Параметр оценки	Механический рециклинг	Химический рециклинг
<b>Температурный режим процесса</b>	150-280°C (температуры плавления полимеров)	400-800°C (пиролиз), 180-400°C (деполимеризация)
<b>Удельные энергозатраты</b>	800-1500 кВт·ч/т регранулята	2000-5000 кВт·ч/т переработанного сырья
<b>Выход полезного продукта</b>	85-92% от массы чистого сырья	Деполимеризация: 72-83% сырца, >40% чистого мономера Пиролиз: 50-80% пиролизного масла
<b>Качество продукта</b>	Downcycling - снижение свойств с каждым циклом	Продукт, эквивалентный первичному сырью
<b>Капитальные затраты</b>	Умеренные	На порядок выше, чем у механического
<b>Эксплуатационные расходы</b>	Основные затраты - сбор и сортировка	Основные затраты - энергоносители и обслуживание
<b>Энергетическая эффективность</b>	Высокая (нагрев только до $t^{\circ}$ плавления)	Низкая (компенсация эндотермических реакций)
<b>Технологические потери</b>	8-15% (брак, обрезки, загрязнения)	20-50% в зависимости от метода и сырья
<b>Сфера применения продукта</b>	Непищевые изделия, стройматериалы	Пищевая упаковка, химическое сырье, топливо

*Анализ энергозатрат.* Энергопотребление является критически важным параметром, определяющим как экономическую, так и экологическую эффективность процесса. Как видно из таблицы 1, механический рециклинг характеризуется значительно более низкими удельными энергозатратами (800-1500 кВт·ч/т) по сравнению с химическими методами (2000-5000 кВт·ч/т). Это объясняется принципиальными различиями в температурных режимах процессов: механическая переработка требует нагрева лишь до температур плавления полимеров (150-280°C), в то время как химический рециклинг предполагает нагрев до 400-800°C при пиролизе с необходимостью компенсации эндотермических реакций разложения полимерных цепей.

*Выход продукции и экономические показатели.* Количество и качество получаемого

продукта напрямую влияют на экономику процесса. Механический рециклинг демонстрирует высокий выход полезного продукта (85-92%), однако сопровождается явлением downcycling - неуклонным снижением молекулярной массы и ухудшением механических свойств материала. В отличие от этого, химический рециклинг, несмотря на более низкий выход целевого продукта (40-83% в зависимости от метода), позволяет получать продукт, эквивалентный первичному сырью, что определяет его более высокую стоимость и возможность использования в производстве пищевой упаковки.

Экономические показатели также существенно различаются: капитальные затраты на строительство завода химического рециклинга на порядок превышают затраты на организацию механической переработки, а в структуре эксплуатационных расходов доминируют затраты на энергоносители,

тогда как для механического рециклинга основные расходы связаны со сбором и сортировкой сырья.

*Методология и результаты сравнительного анализа.* Для объективного сравнения методов была разработана система критериев, охватывающая

технологические, экономические и экологические аспекты. Критерии для таблицы 2 отбирались на основе их значимости для оценки промышленной применимости, потенциала масштабирования и вклада в циркулярную экономику.

Таблица 2. Сравнительная характеристика методов рециклинга полимерных отходов.

Критерий	Механический рециклинг	Химический рециклинг
<b>Принцип действия</b>	Физическая обработка (дробление, плавление)	Химическая деструкция полимерных цепей
<b>Входное сырье</b>	Чистые, односортовые отходы	Смешанные, загрязненные, многослойные отходы
<b>Выходной продукт</b>	Регранулят со сниженными свойствами («downcycling»)	Мономеры, олигомеры, пиролизное масло (продукт, эквивалентный первичному)
<b>Качество продукта</b>	Снижение молекулярной массы и потребительских свойств с каждым циклом	Высокое; позволяет производить сырье для пищевой упаковки
<b>Энергозатраты</b>	Относительно низкие (нагрев до температур плавления)	Высокие (нагрев до высоких температур, эндотермические реакции)
<b>Капитальные затраты</b>	Умеренные	Очень высокие
<b>Экологический аспект</b>	Низкий углеродный след; проблема микропластика при мойке	Споры о воздействии; требует оценки жизненного цикла (LCA); решение проблемы сложных отходов
<b>Технологическая зрелость</b>	Высокая, широко внедрена	Стадия активного развития и коммерциализации
<b>Главное ограничение</b>	Деградация полимера после циклов переработки; непригодность для сложных композитов	Высокая энергоемкость и сложность управления процессом; стоимость
<b>Ключевое преимущество</b>	Энергоэффективность для подходящих фракций	Возможность переработки сложных отходов в сырье высокого качества и замыкания цикла

Сравнительная характеристика позволяет сделать следующие выводы:

1. Области применения методов принципиально различны. Механический рециклинг оптимален для организованных потоков однородных отходов (например, ПЭТ-бутылки). Химический рециклинг является единственным доступным решением для сложных материалов, таких как многослойная упаковка, а также для загрязненных и смешанных пластиков.

2. Экономика процессов определяет их нишу. Рентабельность механического рециклинга сильно зависит от логистики и предварительной сортировки. Химический рециклинг требует значительных

капиталовложений, но создает продукт с более высокой добавленной стоимостью, что может сделать его экономически привлекательным в условиях регулирования и спроса на «зеленые» продукты.

3. Оба метода вносят вклад в циркулярную экономику, но на разных этапах. Механический рециклинг продлевает жизненный цикл материала, а химический – фактически закрывает его, возвращая материал в начало производственной цепочки.

4. Перспективным направлением является комбинирование технологий. Создание интегрированных систем, где механические методы используются для простых фракций, а химические – для сложных и проблемных отходов, позволяет

максимизировать общий процент утилизации и качество вторичного сырья.

### Заключение

Сравнительный анализ, построенный на оценке технологических, экономических и экологических критериев, наглядно демонстрирует, что механический и химический рециклинг являются не конкурентами, а взаимодополняющими технологиями. Выбор метода или их комбинации зависит от морфологии отходов, экономических условий и целевых показателей по качеству вторичного сырья. Развитие отрасли должно идти по пути создания гибких интегрированных систем, сочетающих преимущества обоих методов. Дальнейшие исследования целесообразно направить на снижение энергопотребления химических процессов, разработку эффективных катализаторов, совершенствование методов сепарации и создание точных моделей для оценки их жизненного цикла.

### Список литературы

1. Вторичная переработка многослойной полимерной упаковки (обзор) [Текст] / Яруллин А.Ф., Юсупов Б.Н., Русанова С.Н., Казаков Ю.М., Стоянов О.В. // Вестник технологического университета. — 2024. — Т. 27. — № 2. — С. 29-42.
2. Механическая переработка пластиковых отходов [Текст] / Бикмуаметова Р.Р., Чекмарева О.В. // Региональные проблемы геологии, географии, техносферной и экологической безопасности. — 2021. — С. 31-34.
3. Верховосова, А. И. Основные направления применения химических технологий в строительной

отрасли / А. И. Верховосова, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. — 2024. — Т. 38, № 12(291). — С. 99-101.

4. Технико-экономическая оценка интегрированной системы пластиковых отходов, использующей процессы механической и термохимической переработки [Текст] / Гайнуллина Г.М. // Комплексные проблемы техносферной безопасности. Научный и практический подходы к развитию и реализации технологий безопасности. — 2021. — С. 451-456.

5. Пособие процесса производства синтетического изопренового каучука, ООО «Сибур Тольятти», М.А. Саяпина, Н.И. Пиминова, 2018 г.

6. Оленев Б.А., Мордкович Е.М., Калошин В.Ф. Проектирование производств по переработке пластических масс. М.: Химия, 1982.-254с.

7. Верховосова, А. И. Анализ источников антропогенного загрязнения атмосферного воздуха диоксидом углерода / А. И. Верховосова, Ю. М. Аверина, О. В. Зверева // Успехи в химии и химической технологии. — 2024. — Т. 38, № 12(291). — С. 93-95.

8. Композиционные материалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения / Е. Н. Субчева, Ю. М. Аверина, Е. В. Юртов, О. В. Зверева. — Москва : Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2017. — 128 с.

9. Ахметова, В. Н. Контроллинг на малых инновационных предприятиях / В. Н. Ахметова, Е. А. Барабанщикова, Ю. М. Аверина // Успехи в химии и химической технологии. — 2017. — Т. 31, № 15(196). — С. 76-77

УДК 544.47

Вахитов М.Д., Прохоров В.А.

### Ассиметричный органокатализ и его значение в современной химической науке

Вахитов Максим Дмитриевич, студент 1-го курса бакалавриата факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва;  
Прохоров Вячеслав Александрович, студент 1-го курса бакалавриата факультета ФМиЕН РУДН, Россия, Москва  
Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия.

*Ассиметричный органокатализ является одним из наиболее быстро развивающихся направлений современной химии, который позволяет эффективно проводить синтез биологически активных соединений не только в условиях лабораторного эксперимента и в промышленных масштабах. Органокатализаторы эффективны и безопасны, дешевы и просты в обращении и совместимы с большинством химических реакций. Применение органокатализаторов имеет особое значение в фармацевтической промышленности, поскольку не требует использования дополнительных стадий очистки от примесных количеств металлов, загрязнение которыми неизбежно происходит при использовании металлосодержащих катализаторов. Важное значение ассиметричного органокатализа в современной химической науке и технологии было отмечено присуждением Нобелевской премии по химии в 2021 году известным ученым Б. Листу и Д. Макмиллану, которые внесли заметный вклад в развитие этого научного направления.*

*Ключевые слова: ассиметричный органокатализ, синтез биологически активных соединений, достижения химической науки*

### ASYMMETRIC ORGANOCATALYSIS AND ITS SIGNIFICANCE IN MODERN CHEMICAL SCIENCE

Vakhitov M.D., Prokhorov V.A.

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya Street, Moscow, 117198, Russian Federation

*Asymmetric organocatalysis is one of the fastest developing areas of modern chemistry, which makes it possible to efficiently synthesize biologically active compounds not only in laboratory experiments and on an industrial scale. Organocatalysts are efficient and safe, cheap and easy to handle, and compatible with most chemical reactions. The use of organocatalysts is of particular importance in the pharmaceutical industry, since it does not require the use of additional purification stages from impurity amounts of metals, contamination of which inevitably occurs when using metal-containing catalysts. The importance of asymmetric organocatalysis in modern chemical science and technology was highlighted by the awarding of the Nobel Prize in Chemistry in 2021 to renowned scientists B. List and D. Macmillan, who made a significant contribution to the development of this scientific field.*

*Keywords: asymmetric organocatalysis, synthesis of biologically active compounds, achievements of chemical science*

#### Введение

В настоящее время каталитические технологии повсеместно используются в лабораторных синтезах и в промышленном производстве. Согласно статистическим данным сегодня катализаторы используются для получения более 80 % химической и нефтехимической продукции, составляющей значительную часть мирового ВВП. Современный ассортимент катализаторов и перечень технологических процессов, где они применяются, чрезвычайно велик. Однако при проведении каталитических процессов часто важным моментом является не только скорость реакции, но также возможность селективного получения целевых продуктов определенного строения. Особое значение этот факт имеет при производстве фармацевтической продукции, средств агрохимии и продуктов питания. Например, энантиомеры многих химических соединений могут обладать не только разными физико-химическими свойствами, но и

различной биологической активностью [1]. Известны факты, когда в результате невнимательного отношения к этим вопросам были получены серьезные побочные эффекты от применения соответствующих лекарственных средств. Поэтому для биологически активных соединений постоянно растут требования по синтезу энантиомерно чистых продуктов. Поэтому разработка новых катализаторов и технологий их применения с целью производства оптически чистых соединений сегодня является одним из основных направлений развития органического синтеза [2].

#### Ассиметричный органокатализ и его применение

До недавнего времени большинство энантиоселективных катализаторов представляли собой либо ферменты, либо соединения переходных металлов. Однако обе эти группы катализаторов, наряду с положительными сторонами, имеют существенные недостатки. Например, катализаторы на основе переходных металлов часто не

обеспечивают необходимую селективность протекания реакции и загрязняют конечный продукт. В результате синтезируемое целевое соединение получает наследуемую примесь с высокой токсичностью, от которой можно избавиться только введением в технологическую схему дополнительных операций очистки и аналитического контроля. Ферменты, как природные катализаторы, наиболее полно отвечают современным требованиям «зеленой» химии, но их масштабное применение в органическом синтезе часто ограничивается сложностью наработки необходимых количеств катализатора, узким температурным диапазоном их применения и невозможностью использования в синтезе большинства органических растворителей.

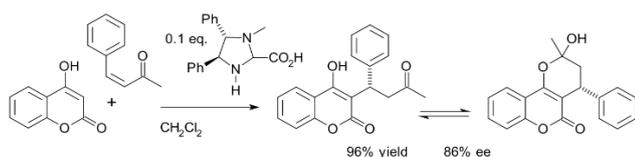


Рис. 1. Использование ассиметричного органокатализа для синтеза биологически активных соединений

Благодаря результатам исследований ряда научных групп, появился новый вид катализаторов, представляющие собой хиральные соединения, которые оказались катализаторами сложных химических превращений в практически важных процессах. При этом эффективность катализа в некоторых случаях была выше, чем при использовании ферментов и металлсодержащих катализаторов. Комплексная оценка позволяет говорить, что в настоящее время ассиметрические органокатализаторы имеют конкурентные преимущества перед другими каталитическими системами за счет их низкой стоимости производства, высокой эффективности и экологической безопасности. В 2000 году появились две научные статьи, ставшие началом признания ассиметричного органокатализа [3-4].

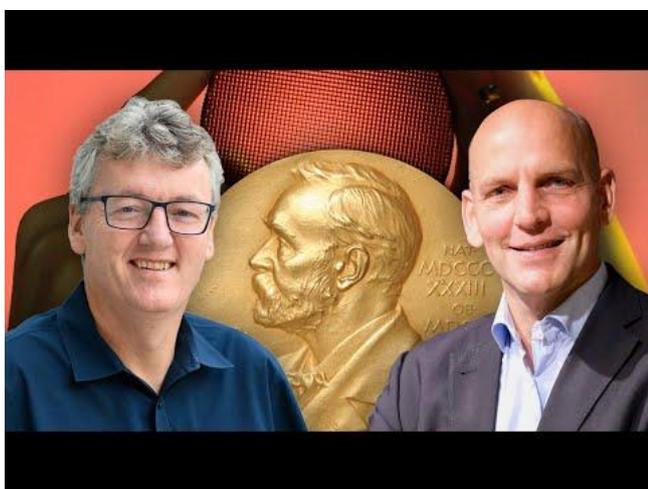


Рис. 2. Дэвид Макмиллан и Бенджамин Лист, Нобелевские лауреаты по химии 2021 года

Так Б. Лист и его коллеги описали межмолекулярную альдольную реакцию, катализируемую L-пролином, а Д. Макмиллан с сотрудниками представили результаты исследования реакции Дильса-Альдера  $\alpha,\beta$ -ненасыщенных альдегидов с циклопентадиеном, катализируемой хиральными солями имидазолидинона [3-4]. После этих первых работ Б. Листа и Д. Макмиллана появилось много научных публикаций, в которых описывались новые катализаторы и реакции, характерные для этого типа катализа. Благодаря дальнейшим исследованиям Б. Листа и Д. Макмиллана, были открыты несколько новых органокаталитических реакций с использованием L-пролина и хиральных имидазолидинонов. Например, L-пролин был применен в качестве катализатора в ассиметричных реакциях Манниха,  $\alpha$ -аминирования альдегидов, а хиральные имидазолидиноны в реакциях 1,3-диполярного циклоприсоединения, реакциях Фриделя-Крафтса, реакциях Михаэля и домино-реакциях [1-2, 5].

В знак признания заслуг перед мировым научным сообществом в 2021 году Бенджамин Лист и Дэвид Макмиллан стали лауреатами Нобелевской премии по химии за разработку теории ассиметричного органокатализа.

Следует отметить, что применение органокатализаторов в промышленном многотоннажном синтезе ограничено возможностями их предварительной наработки в больших количествах, сложностью выделения из реакционной массы и повторного использования для обеспечения рабочего ресурса. Для решения этой проблемы в настоящее время предложено использовать гетерогенные каталитические системы, в которых органокатализатор находится на поверхности пористого носителя, в качестве которого могут быть использованы цеолиты, активированный уголь, оксид алюминия, а также полимерные материалы [6]. Способ изготовления таких катализаторов должен обеспечить их устойчивость в условиях синтеза, возможность многократного использования без заметного снижения активности и возможность безопасной утилизации после завершения использования. Прогресс в этой области гетерогенного катализа свидетельствует о значительных перспективах промышленного применения таких каталитических систем. Известны примеры, когда гетерогенный катализатор в реакциях ассиметрической альдольной конденсации проявил активность выше, чем его исходный аналог. Показано, что ассиметрические реакции Дильса-Альдера с использованием нанесенного на полимерный носитель имидазолидинона протекают с высоким выходом и энантиомерной чистотой конечного продукта.

### Заключение

Развитие современной органической химии и технологии невозможно без использования современных катализаторов, среди которых ассиметричный органокатализ занимает заметное

место. Его применение позволяет синтезировать энантиомерно чистые целевые продукты, обладающие практически важными свойствами. Применение таких каталитических систем имеет большое значение в фармацевтической и агрохимической промышленности, где требуется получение высокочистых биологически активных соединений определенного строения.

*Данная публикация подготовлена по результатам работы студенческого научного кружка кафедры Физической и коллоидной химии РУДН имени П. Лумумбы*

#### Список литературы

1. Василевич Н.И. Органокатализ – совпременный метод проведения ассиметричного синтеза // Лаборатория и производство. – 2022. - № 1. - С. 1-8.
2. Parella R., Jakkampudi S., ZhaoRecent J. C.-G. Applications of Asymmetric Organocatalytic Methods in Total Synthesis // ChemistrySelect. – 2021. - Vol. 6, № 9. - P. 2252-2280.
3. Ahrendt K.A., Borths C.J., MacMillan D.W.C. New Strategies for Organic Catalysis: The First Highly Enantioselective Organocatalytic Diels–Alder Reaction // Journal of the American Chemical Society. – 2000.- Vol.122, № 17. - P. 4243-4244.
4. List B., Lerner R.A., Barbas C.F. Proline catalyzed direct asymmetric aldol reactions // J. Am. Chem. Soc. 2000. - Vol. 122, № 10. - P. 2395-2396.
5. MacMillan D.W.C. The advent and development of organocatalysis // Nature. 2008. - Vol. 455. - P. 304-308.
6. Wang C.A., Zhang Y., Shi J.Y., Wang W. A Self-Supported Polymeric MacMillan Catalyst for Homogeneous Organocatalysis and Heterogeneous Recycling // Chem-Asian J. – 2013. – Vol. 8, Issue 6. – P. 1110-1114.

УДК 631.4

Самаркина А., Журавлева О.С.

### Современные подходы к моделированию гумификации в лесном хозяйстве

Самаркина Анна – магистр 1-го года обучения; 211171@muctr.ru;

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; zhuravleva.o.s@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены современные подходы к моделированию гумификации в лесном хозяйстве. Показано, как развитие процессно-ориентированных и микробно-ориентированных моделей позволяет описывать образование гумуса и запасы органического вещества в почвах при различных вариантах ведения леса и изменении климата. Обсуждаются возможности применения моделей для оценки углеродного баланса лесных экосистем и поддержки управленческих решений.*

*Ключевые слова: гумификация, почвы лесных экосистем, моделирование, гумус, углеродный баланс.*

### Modern Approaches to Modeling Humification in Forest Management

Samarkina A., Zhuravleva O.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,

Moscow, Russian Federation

*The article examines modern approaches to modeling humification in forest management. It demonstrates how the development of process-oriented and microbially-oriented models makes it possible to describe humus formation and the accumulation of organic matter in forest soils under various forest management practices and climate change conditions. The possibilities of applying these models to assess the carbon balance of forest ecosystems and to support management decisions are discussed.*

*Keywords: humification, forest soils, modeling, humus, carbon balance.*

#### Введение

Почва лесных экосистем служит крупнейшим наземным хранилищем углерода, в верхнем метре почв накоплено порядка 1700 гига тонн органического углерода – больше, чем в биомассе растительности и атмосфере вместе взятых [1]. Даже незначительные изменения запасов почвенного углерода способны заметно влиять на концентрацию CO<sub>2</sub> в атмосфере и, следовательно, на климат [1]. Важнейшей составляющей почвенного органического вещества является гумус – стабильные органические соединения, образующиеся в результате гумификации растительного опада. Гумификация представляет собой процесс превращения мёртвых органических остатков в специфические гумусовые вещества (гуминовые кислоты, гумины, фульвокислоты) под действием микроорганизмов [2]. Эти высокомолекулярные соединения разлагаются значительно медленнее сырого детрита [2], что приводит к накоплению устойчивого органического вещества в почве. В лесных экосистемах гумус в основном формируется в лесной подстилке и верхнем слое почвы. Этот слой находится между свежим опадом и минеральной почвой и играет важную роль в удержании углерода и в круговороте питательных элементов. Поэтому процессы гумификации напрямую влияют на плодородие лесных почв, рост и состояние деревьев, а также на долгосрочное накопление углерода, важное для смягчения климатических изменений.

Моделирование гумификации – важный инструмент для прогнозирования динамики

органического вещества почв при различных сценариях лесопользования и климата. Адекватные модели гумусообразования позволяют количественно оценивать влияние лесохозяйственных мероприятий (например, вырубок, лесовосстановления) на баланс углерода и плодородие почв, а также учитывать почвенный углерод в стратегиях борьбы с изменением климата. Однако создание таких моделей сопряжено с трудностями: процесс гумификации является многофакторным, зависит от состава опада, климата, микробиоты, свойств почвы и др. Кроме того, до сих пор не существует единой всеобъемлющей модели гумусонакопления, полностью описывающей этот процесс во всех деталях. Тем не менее, за последние десятилетия произошёл значительный прогресс: от классических эмпирических моделей гумусового баланса до современных процессно-ориентированных симуляций, использующих достижения биохимии и искусственного интеллекта. В данной статье рассматриваются теоретические основы гумификации, эволюция подходов к её моделированию – от классических концепций до новейших методов – а также их применение в лесном хозяйстве. Обсуждаются достижения и ограничения существующих моделей и намечаются перспективные направления дальнейших исследований.

#### Теоретические основы гумификации

Гумификация протекает параллельно с минерализацией органического вещества. В ходе разложения растительного опада сначала происходит

ферментативное расщепление сложных биополимеров (целлюлозы, лигнина, полифенолов) почвенными микроорганизмами и грибами. Часть образовавшихся соединений минерализуется до  $\text{CO}_2$ , а часть вовлекается в реакции конденсации и полимеризации, формируя гумусовые вещества [2].

Традиционно выделяют три группы гумусовых веществ, различающихся по растворимости и степени полимеризации: гуминовые кислоты, фульвокислоты и гумины [3]. Они способны длительно сохраняться в почве, особенно при образовании органоминеральных комплексов с глинистыми частицами, что обеспечивает устойчивое накопление углерода и улучшает физико-химические свойства почвы (структуру, влагоёмкость, буферность) [4].

На скорость гумификации влияют климат (температура и влажность), видовой состав растительности и качество опада, гранулометрический состав и кислотность почвы, обеспеченность питательными элементами, а также состав микробиоты и почвенной фауны [5]. В холодном и влажном климате разложение замедляется, что способствует формированию мощной лесной подстилки (формы мор, модер), тогда как в тёплых условиях органика минерализуется быстрее, и гумус концентрируется в более тонком гумусовом горизонте. Лесохозяйственные мероприятия, пожары и удобрения также существенно изменяют направление и скорость гумификации.

Для оценок гумусного баланса используется понятие коэффициента гумификации — доли углерода растительных остатков, переходящей в гумус при их полном разложении [6]. Коэффициенты гумификации для различных видов органики (солома, древесный опад, навоз и др.) традиционно применяются в агрономических расчётах и легли в основу первых моделей гумусного баланса. [7]

### Классические модели гумусообразования

Первые формализованные представления о гумификации появились в середине XX века. В отечественной школе важный вклад внесли работы И. В. Тюрина и В. В. Пономарёвой, где были предложены подходы к оценке предельных запасов гумуса в зависимости от притока органического вещества и условий среды. Аналогичные по духу модели развивались и за рубежом, где гумус рассматривался как результат динамического равновесия между поступлением опада и его разложением [9].

С развитием экосистемной экологии во второй половине XX века появились динамические модели круговорота углерода, такие как CENTURY, RothC, DNDC [10]. В них почвенное органическое вещество делится на несколько пулов (быстрый, медленный, пассивный), а переход углерода между ними описывается уравнениями кинетики первого порядка. Микроорганизмы учитываются косвенно — через константы скорости распада. [11]

Эти модели сравнительно просты, хорошо калибруются по полевым данным и до сих пор используются для оценки плодородия почв и глобального углеродного баланса.

У классических моделей есть ограничения: они слабо воспроизводят нелинейные эффекты (например, ускорение разложения гумуса при поступлении свежего субстрата), чувствительны к резким изменениям условий и плохо описывают сохранение легкоразлагаемых соединений в течение длительного времени [10]. Кроме того, они в меньшей степени опираются на современные представления о структуре и механизмах стабилизации почвенного органического вещества. Это стимулировало развитие более детальных, процессно-ориентированных моделей [12].

### Современные подходы к моделированию

Современные модели гумификации опираются на обновлённые представления о природе почвенного органического вещества. Согласно новым концепциям, устойчивость углерода определяется не столько «особой химической инертностью» отдельных соединений, сколько сочетанием микробного распада и механизмов физико-химической защиты (сорбция на минералах, инкапсулирование в агрегатах и др.) [11].

В ряде работ предлагается вместо абстрактных «быстрых» и «медленных» пулов использовать фракции, которые реально выделяются при анализе почвы: частичное органическое вещество (ПОМ) и органика, связанная с минералами (МАОМ) [12]. ПОМ быстрее перерабатывается микробами, а МАОМ защищён сорбцией и более стабилен. Это облегчает сопоставление модели с измеряемыми параметрами и калибровку по данным фракционирования.

Следующий шаг — микробно-ориентированные модели (MIMICS, CORPSE, Millennial и др.), в которых явно задаются пулы микробной биомассы и ферментов. В таких моделях используется нелинейная кинетика типа Михаэлиса–Ментен, учитывающая ограниченность процесса либо субстратом, либо ферментами. Это позволяет лучше описывать наблюдаемые колебания потока  $\text{CO}_2$  из почвы и реакции на изменения влажности и температуры.

Отдельное направление связано с использованием методов машинного обучения и больших данных. В последние годы появились работы, в которых глобальные наборы наблюдений по запасам углерода в почвах анализируются методами машинного обучения. Такие подходы позволяют уточнять влияние множества факторов (продуктивности растительности, температуры, влажности, обеспеченности азотом, типа землепользования и др.) на содержание гумуса и выявлять закономерности, которые затем могут быть интегрированы в процессно-ориентированные модели. На основе этих методов развиваются системы

цифрового картирования почв, формирующие детальные карты запасов углерода [12].

Современное развитие моделирования гумификации связано с междисциплинарной интеграцией. Биохимические исследования структуры гумусовых веществ, данные о составе микробиоты и почвенной фауны (дождевые черви, насекомые-деструкторы) начинают включаться в модельные схемы. Примером служат модели семейства ROMUL/EFIMOD, где учитываются типы лесной подстилки, формы гумуса и связанные с ними комплексы почвенных организмов.

### Применение моделей в лесном хозяйстве

В лесохозяйственной практике модели гумификации используются прежде всего для трёх задач:

#### 1. Оценка баланса углерода.

Модели типа CENTURY, RothC, Yasso применяются для расчёта изменений запасов углерода в почвах при разных вариантах лесопользования и климатических сценариях [1,5].

Эти оценки необходимы при формировании национальных кадастров парниковых газов и разработке программ по углеродосбережению.

#### 2. Прогноз плодородия почв и продуктивности леса.

Интегрированные экосистемные модели (например, EFIMOD) описывают совместную динамику древостоя и почвы: разложение подстилки, накопление гумуса и цикл азота рассчитываются параллельно с ростом деревьев [5]. Это позволяет оценивать, как смена пород, режим рубок или повреждения леса отразятся на запасах питательных элементов и продуктивности насаждений.

#### 3. Поддержка управленческих решений.

Совмещение моделирования с ГИС-технологиями и цифровым картированием позволяет строить карты запасов гумуса, выявлять участки с риском деградации почв и обосновывать меры по их восстановлению (например, регулирование выноса порубочных остатков). Модели включаются в системы поддержки принятия решений, что делает учёт почвенного углерода частью практического лесного планирования.

### Дискуссия

Современное моделирование гумификации развивается в нескольких направлениях, каждое из которых имеет собственные теоретические и

прикладные приоритеты. В таблице 1 приведена классификация существующих моделей по принципу их концептуального устройства, с указанием характерных примеров, основных преимуществ и ограничений.

Классические модели, основанные на эмпирических балансовых уравнениях и концепции пулов органического вещества, продолжают использоваться благодаря простоте, низким требованиям к входным данным и проверенной практике применения. Тем не менее, они часто оказываются недостаточно чувствительными к локальным изменениям условий среды и не отражают механизмы стабилизации органики. Более новые процессно-ориентированные модели стремятся устранить эти ограничения за счёт описания динамики фракций почвенного углерода (например, POM и MAOM) и учёта физико-химических взаимодействий с почвенной матрицей.

Особое развитие получили микробно-ориентированные модели, в которых ключевое внимание уделяется функционированию почвенной биоты, прежде всего микробных сообществ и ферментативных процессов. Они позволяют лучше понимать и прогнозировать отклики почвенной системы на экстремальные климатические события, лесохозяйственные вмешательства и другие внешние воздействия. Однако высокая степень детализации таких моделей требует тщательной настройки, что затруднено в условиях нехватки полевых данных.

Параллельно развивается направление, связанное с применением технологий машинного обучения и цифрового картографирования. Такие модели позволяют автоматизировать обработку больших массивов данных и выявлять ранее неочевидные зависимости. Несмотря на это, они нередко выступают в роли "чёрного ящика", что вызывает затруднения при интерпретации и практическом использовании полученных результатов.

Наиболее перспективным направлением на сегодняшний день представляется комбинирование подходов — в частности, использование гибридных моделей, которые сочетают биофизическую обоснованность с вычислительными возможностями ИИ. Это даёт возможность повысить точность прогнозов и адаптировать модели к конкретным природным и управленческим условиям, что особенно важно для задач устойчивого лесопользования.

Таблица 1 – Сравнительный анализ моделей гумификации

Группа моделей	Примеры	Основные достоинства	Основные недостатки / ограничения
Классические балансовые и многокомпарментные	Тюрин, Пономарёва; CENTURY, RothC, DNDC	Простота структуры и калибровки; низкие вычислительные затраты; успешный опыт применения для оценки гумусного баланса и углеродных запасов на больших территориях	Условный характер пулов; слабая связь с измеряемыми фракциями органического вещества; ограниченное описание микробных процессов и нелинейных эффектов; трудности при экстраполяции на новые условия
Процессно-ориентированные модели с учётом фракций РОМ/МАОМ	модификации RothC, модели с органо-минеральными пулами	Более тесная связь с современными представлениями о стабилизации углерода; возможность калибровки по данным фракционирования; лучшая интерпретируемость результатов	Увеличение числа параметров; необходимость детальных входных данных по составу почв и опада; чувствительность к качеству исходной информации
Микробно-ориентированные модели	MIMICS, CORPSE, Millennial, ROMUL_Hum	Явное описание роли микробов и ферментов; возможность моделировать прайминг-эффект и отклики на экстремальные события; более реалистичное представление о механизмах гумификации	Сложная структура; высокая параметризуемость; трудности экспериментальной проверки всех блоков; рост неопределённости при масштабировании от экспериментальных участков к ландшафтам
Модели на основе ИИ и гибридные системы	цифровое картирование почв, SoilGrids, модели с ML-модулями	Эффективная обработка больших массивов данных; возможность выявлять нетривиальные зависимости; получение высокодетализированных карт запасов углерода и сценарных прогнозов	Ограниченная интерпретируемость «чёрных ящиков»; необходимость репрезентативных обучающих выборок; риск переобучения;

### Перспективы развития

Несмотря на прогресс в области моделирования гумификации, остаются нерешёнными ключевые задачи: учёт микробных процессов, ограничение по насыщению почв углеродом, моделирование гумуса в глубоких горизонтах и недостаточная интеграция эмпирических данных.

Одним из перспективных направлений является внедрение микробно-ориентированных моделей, отражающих ферментативную активность, динамику микробных пулов и азотные ограничения. Также важно учитывать предельную ёмкость почвы по углероду (концепция насыщения), что позволяет точнее прогнозировать возможности устойчивого накопления органического вещества.

Расширение моделируемой глубины за счёт включения вертикального переноса органики, биотурбации и корневых отложений позволит повысить точность оценок углеродного баланса. Внедрение методов машинного обучения — ещё одно важное направление, способствующее улучшению

калибровки моделей и выявлению скрытых зависимостей в больших массивах данных.

К достоинствам современных моделей относятся высокий уровень детализации и адаптивность к различным экосистемам. Основные ограничения - сложность структуры, высокая параметрическая нагрузка и недостаточная воспроизводимость. Их преодоление возможно за счёт стандартизации данных, развития иерархических подходов и расширения междисциплинарного взаимодействия.

### Заключение

Моделирование процессов гумификации является важным инструментом для оценки динамики углерода в лесных экосистемах. Современные модели стали более реалистичными за счёт учёта микробных механизмов, насыщения почв углеродом и пространственной гетерогенности. Однако остаются методологические сложности, связанные с параметризацией, валидацией и масштабированием. Дальнейшее развитие направлено на интеграцию

эмпирических данных, использование искусственного интеллекта и междисциплинарных подходов. Это позволит повысить точность прогнозов и применимость моделей в лесном управлении и климатических стратегиях.

В условиях ужесточающихся экологических требований и необходимости учёта углеродных потоков в природопользовании такие модели приобретают прикладное значение. Они становятся основой для систем поддержки принятия решений, оценки устойчивости лесов к климатическим изменениям и планирования мероприятий по увеличению углеродной ёмкости почв. Поэтому совершенствование моделей гумификации - это не только научная задача, но и вклад в разработку инструментов устойчивого управления лесными территориями.

В перспективе моделирование гумификации может сыграть ключевую роль в формировании национальных и международных стратегий по охране почв и смягчению последствий изменения климата. Точное представление о процессах накопления и потерь углерода в лесных почвах необходимо для обоснования природных климатических решений, таких как восстановление лесов, сохранение почвенного покрова и адаптация лесных экосистем. Это делает задачу разработки и внедрения надёжных моделей гумусообразования особенно актуальной на стыке науки, политики и управления природными ресурсами.

#### Список литературы:

1. Ryzhova, I. M., Romanenkov, V. A., Stepanenko, V. M. Modern Development of Soil Organic Matter Dynamics Models (Review). Moscow Univ. Soil Sci. Bull. 79, 493–499 (2024) .

2. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / А. И. Попов ; под ред. Е. И. Ермакова. — СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2004. — 148 с.

3. Гришина Л.А. Гумусообразование и гумусное состояние почв. М.: Изд-во МГУ (1986).

4. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry, 86, 19–31 (2007).

5. Brady N.C., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils. 15th ed. Pearson (2018).

6. Пономарёва В.В. Почвообразование. М.: Колос (1964).

7. Jenkinson D.S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 329(1255), 361–368 (1990).

8. Kuzyakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. Soil Biology & Biochemistry, 42(5), 712–725 (2010).

9. Kuzyakov Y. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. Soil Biology & Biochemistry, 42(5), 712–725 (2010).

10. Суховеева, О. Э., Карелин, Д. В. (2019). Параметризация модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода на европейской территории России. Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 64 (2), 363–384.

11. Bradford M.A., Fierer N. Extraction of microbial products from soils with the cation exchange resin, Amberlite XAD-8: optimizing protocols and comparing results to other techniques. Soil Biology & Biochemistry, 47, 16–24 (2012).

12. Stewart C.E., Paustian K., Conant R.T., Plante A.F., Six J. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation. Biogeochemistry, 86, 19–31 (2007)

УДК 004.8:631.4

Акчурин И.И., Журавлева О.С.

**Анализ регрессионных и нейросетевых моделей для разработки алгоритма анализа динамики гумификации**

Акчурин Ильядар Ильясович – студент группы МТ-18; 210034@muctr.ru.

Журавлева Ольга Станиславовна – старший преподаватель кафедры Логистики и экономической информатики; В статье представлен подход к моделированию динамики гумификации – ключевого процесса почвообразования – с применением методов машинного обучения. Теоретически обоснована целесообразность использования гибридного алгоритма, комбинирующего множественную линейную регрессию и искусственную нейронную сеть прямой связи (Multilayer Perceptron). В рамках методологического экспериментального раздела проведен сравнительный анализ прогнозируемой эффективности различных моделей (регрессионных, нейросетевых и гибридной) и систематизированы ключевые сложности, сопряженные с разработкой подобных алгоритмов, такие как проблема данных, интерпретируемость моделей и риск переобучения. Предложены пути их преодоления, включая использование методов Explainable AI (XAI) и физически информированного машинного обучения. Результаты работы формируют основу для создания инструментов прогнозной аналитики в области цифрового картографирования почв и устойчивого землепользования.

Ключевые слова: гумификация, машинное обучение, регрессионный анализ, искусственные нейронные сети, гибридная модель, цифровое картографирование почв.

**Analysis of regression and neural network models for developing an algorithm for analyzing the dynamics of humification**

Akchurin I.I., Zhuravleva O.S.

The article presents an approach to modeling the dynamics of humification, a key process of soil formation, using machine learning methods. The article theoretically substantiates the feasibility of using a hybrid algorithm that combines multiple linear regression and an artificial neural network with direct connections (Multilayer Perceptron). Within the framework of the methodological experimental section, a comparative analysis of the predicted efficiency of various models (regression, neural network, and hybrid) was conducted, and the key challenges associated with the development of such algorithms, such as the data problem, interpretability of models, and the risk of overfitting, were systematized. Ways to overcome these challenges were proposed, including the use of Explainable AI (XAI) methods and physically informed machine learning. The results of this work form the basis for creating predictive analytics tools in the field of digital soil mapping and sustainable land use.

Keywords: humification, machine learning, regression analysis, artificial neural networks, hybrid model, digital soil mapping..

**Введение**

Динамика процесса гумификации, определяющего накопление стабильного органического вещества (гумуса) и глобальный цикл углерода, характеризуется исключительной сложностью и нелинейностью [1]. Этот процесс зависит от многофакторных взаимодействий климатических условий, исходного состава органического материала, биохимической активности и физико-химических свойств почвенной среды [2]. Экспериментальные исследования, например, трансформации низкомолекулярных органических соединений в почвах, наглядно демонстрируют сезонную и пространственную вариабельность этих процессов [3, 4]. Традиционные детерминированные и статистические модели зачастую оказываются недостаточно гибкими для адекватного описания и, что важнее, прогнозирования такой сложной системы.

В последнее десятилетие методы машинного обучения (МО) стали стандартным инструментом в цифровом картографировании почв (ЦКП) для прогнозирования пространственного распределения их статических свойств [5, 6]. Однако задача моделирования \*временной динамики\* процессов, подобных гумификации, остается значительно менее

изученной. Данная работа ставит целью теоретическое и методологическое обоснование разработки гибридного алгоритма, предназначенного для анализа динамики гумификации. Алгоритм призван сочетать интерпретируемость регрессионных моделей с высокой прогностической способностью нейронных сетей, а также предложить решения для сопутствующих методологических вызовов.

**Теоретическая часть**

Регрессионный анализ исторически является основой эмпирического моделирования в почвоведении. Множественная линейная регрессия (MLR) устанавливает количественную связь между целевой переменной (индекс гумификации) и набором предикторов (содержание C, N, температура и др.) [7]. Полиномиальная регрессия расширяет возможности MLR, позволяя учитывать нелинейные, но монотонные зависимости. Основное преимущество этих моделей – физическая интерпретируемость коэффициентов. Однако их существенным ограничением является неспособность улавливать сложные взаимодействия между факторами и высокоразмерные нелинейные паттерны, что критично для моделирования биогеохимических процессов [6].

Рассмотрим искусственные нейронные сети (ИНС), в частности многослойные перцептроны (MLP), представляющие собой более мощный и гибкий аппарат. Благодаря архитектуре из последовательных слоев с нелинейными функциями активации, ИНС способны аппроксимировать сколь угодно сложные зависимости [8]. В контексте почвоведения глубокое обучение успешно применяется для прогнозирования содержания органического углерода на основе данных дистанционного зондирования и прокси-переменных [5, 9]. Несмотря на высокую потенциальную точность, нейросети часто критикуют как «черный ящик», что затрудняет интерпретацию вклада отдельных факторов.

Также особое внимание стоит уделить созданию гибридных или ансамблевых моделей, комбинирующих сильные стороны разных подходов [6, 10]. В данной работе основной упор сделан на анализ различных методологий, в перспективе есть огромная возможность по созданию архитектуры связи между различными подходами. Предлагается архитектура, в которой регрессионная модель (MLR) служит для выделения основной линейной компоненты зависимости, и, затем, искусственная нейронная сеть (MLP) обучается на остатках (errors) регрессии, моделируя сложные нелинейные паттерны, которые не удалось объяснить первой моделью. Такой подход направлен на достижение баланса между интерпретируемостью и точностью и соответствует современному тренду в науке о данных.

Эффективное моделирование динамики гумификации сталкивается с рядом объективных сложностей, проистекающих из природы почвенных систем:

- Высокая пространственная и временная неоднородность. Свойства почвы могут существенно варьироваться на расстоянии даже нескольких метров и изменяться в течение сезона [11]. Это требует либо плотной сетки опробования, либо разработки косвенных методов оценки, например, цифрового картографирования почв (ЦКП) с использованием данных дистанционного зондирования [12].
- Многофакторность и взаимозависимость процессов. Гумификация регулируется комплексом взаимосвязанных факторов: климатических, биологических, физико-химических и антропогенных. Выделение вклада каждого фактора в условиях их коллинеарности является нетривиальной статистической задачей.
- Дефицит и «стоимость» качественных данных. Создание репрезентативных наборов данных для обучения моделей, особенно для долгосрочной динамики, требует многолетних полевых экспериментов и дорогостоящих лабораторных анализов. Это ограничивает объем выборок и повышает риск переобучения сложных моделей.

Для построения адекватной модели анализа динамики гумификации необходима интеграция данных, комплексно описывающих почвенную экосистему. Ключевыми группами предикторов выступают почвенно-агрохимические показатели (содержание органического углерода и азота, соотношение C/N, pH, гранулометрический состав), которые являются основным субстратом и средой для процесса. Биологические и биохимические факторы, такие как активность ферментов (пероксидазы, полифенолоксидазы) и интенсивность микробного дыхания, служат прямыми индикаторами скорости и направленности трансформации органического вещества [4, 13]. Динамику процесса регулируют физические и климатические условия (температура, влажность почвы, тип растительного покрова). Наконец, пространственно-временные данные дистанционного зондирования (вегетационные индексы) и цифровые модели рельефа выступают в качестве важных прокси-переменных для экстраполяции точечных измерений и оценки динамики на обширных территориях, особенно на залежных землях [14].

Максимальной эффективности в моделировании таких комплексных систем позволяют достичь гибридные подходы, где регрессионная компонента отвечает за интерпретируемую, основанную на знаниях часть модели, а нейросетевая компонента улавливает сложные нелинейные взаимодействия.

#### Методологический анализ и прогнозируемые результаты

Разработка алгоритмов анализа динамики гумификации сопряжена с рядом методологических сложностей. Во-первых, это проблема данных: экспериментальные данные долгосрочны и затратны в получении, выборки часто малоразмерны и зашумлены [4]. Во-вторых, проблема интерпретируемости («черный ящик») особенно остра для нейросетей. В-третьих, существует риск переобучения сложных моделей на ограниченных данных.

Для их преодоления предлагается:

- 1) Использование методов аугментации данных и активного обучения;
- 2) Применение методов Explainable AI (XAI), таких как SHAP, для пост-хок анализа важности признаков в сложных моделях [6];
- 3) Строгое следование протоколам МО (кросс-валидация, регуляризация).

На основании теоретического анализа можно прогнозировать следующую градацию эффективности моделей:

1. MLR покажет базовую, но ограниченную эффективность (ожидаемый  $R^2 \sim 0.75-0.80$ ), адекватно описав лишь общие линейные тренды.
2. Полиномиальная регрессия несколько улучшит результат (ожидаемый  $R^2 \sim 0.80-0.85$ ), но будет склонна к переобучению.
3. ИНС (MLP) продемонстрирует существенно более высокую точность (ожидаемый  $R^2 >$

0.90) за счет выявления скрытых нелинейных взаимодействий.

4. Гибридный алгоритм (MLR + MLP), как ожидается, достигнет наилучших результатов (ожидаемый  $R^2 > 0.93$ ) благодаря синергии методов и снижению нагрузки на нейросеть, что может уменьшить риск переобучения [10].

#### Заключение

Теоретический и методологический анализ подтверждает перспективность применения гибридных моделей машинного обучения для анализа динамики гумификации. Предложенная архитектура, сочетающая множественную линейную регрессию и искусственную нейронную сеть, представляет собой стратегический ответ на ключевые вызовы: необходимость учета сложных нелинейностей при обеспечении интерпретируемости и устойчивости модели.

Основной практический вывод заключается в том, что успешная разработка прогнозного алгоритма требует не только выбора математического аппарата, но и комплексного решения сопутствующих задач: от планирования эксперимента для сбора качественных данных до интеграции предметных знаний и методов ХАИ для объяснения результатов. Внедрение подобного подхода позволит перейти от статической оценки запасов гумуса к динамическому прогнозированию его изменений, что критически важно для задач адаптивного землепользования, управления углеродным балансом и разработки стратегий устойчивого развития агроэкосистем.

#### Список литературы

1. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. — 2015. — Vol. 528. — P. 60–68.
2. Liang C., Schimel J.P., Jastrow J.D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage // *Nature Microbiology*. — 2017. — Vol. 2. — Article 17105.
3. Фокин А.Д., Журавлева О.С. Сезонные особенности превращения и транспорта урацила, глицина и глюкозы в почвах подзолистого типа // *Почвоведение*. — 2009. — № 4. — С. 412–418.
4. Журавлева О.С., Торшин С.П. Превращения урацила, глицина и глюкозы, поступающих в составе опада в лесную подстилку дерново-подзолистой

почвы // *Известия ТСХА*. — 2023. — Вып. 2. — С. 13–25.

5. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Using deep learning for digital soil mapping // *Soil*. — 2019. — Vol. 5. — № 1. — P. 79–89.
6. Wadoux A.M.J.-C., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions // *Earth-Science Reviews*. — 2020. — Vol. 210. — Article 103359.
7. McBratney A.B., Minasny B., Stockmann U. *Pedometrics*. — Springer, 2018. — 400 p.
8. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. — MIT Press, 2016. — 800 p.
9. Некрасов А.А., Семенов В.М. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования содержания гумуса в почве // *Почвоведение*. — 2020. — № 12. — С. 1505–1515.
10. Wolpert D.H. Stacked generalization // *Neural Networks*. — 1992. — Vol. 5. — № 2. — P. 241–259.
11. Гопп Н.В., Мешалкина Ю.Л., Нарыкова А.Н. и др. Картографирование содержания и запасов органического углерода почв на региональном и локальном уровнях: анализ современных методических подходов // *Лесные и урбоэкосистемы: проблемы и перспективы развития*. — 2023. — Т. 6. — № 1. — С. 1–20.
12. Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Смирнова Е.В. и др. Цифровое картографирование показателей, определяющих сорбционные свойства почв по отношению к поллютантам, по данным дистанционного зондирования Земли с применением машинного обучения // *Георесурсы*. — 2022. — Т. 24. — № 4. — С. 181–191.
13. Воробьев Н.И. Нейросетевое ранжирование агротехнологий по индексам микробиологической активности почвы и почвенного плодородия: новые возможности статистического анализа // *Сельскохозяйственная биология*. — 2025. — Т. 60. — № 1. — С. 70–81.
14. Гиниятуллин К.Г., Сахабиев И.А., Рязанов С.С. и др. Возможность использования зонирования залежной растительности по вегетационным индексам для оценки накопления органического вещества в постагрогенных почвах // *Почвоведение*. — 2023. — № 8. — С. 970–980.
15. Padarian J., Minasny B., McBratney A.B. Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools // *SOIL*. — 2020. — Vol. 6. — P. 35–52.

УДК

Савинков С.В., Панферова Е. М.

## Современные методы производства драгоценных металлов

Панферова Екатерина Максимовна – студентка; panferov@gmail.com

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва.

*В статье рассмотрены современные технологии производства драгоценных металлов (золото, серебро, платиновые металлы) на основе отраслевого справочника НДТ. Она охватывает сырьевую базу, гидро-/пиро-/электрометаллургические методы (выщелачивание, обогащение, рафинирование), экологические аспекты НДТ и тенденции развития отрасли в России.*

*Ключевые слова: драгоценные металлы, пирометаллургия, гидрометаллургия, наилучшие доступные технологии, аффинаж.*

### Modern Methods for the Production of Precious Metals

Savinkov S.V., Panferova E. M.

D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia.

*The article reviews modern technologies for the production of precious metals (gold, silver, platinum group metals) based on the industry BAT (Best Available Techniques) reference book. It covers the raw material base, hydrometallurgical/pyrometallurgical/electrometallurgical methods (leaching, beneficiation, refining), environmental aspects of BAT, and development trends in the industry in Russia.*

*Keywords: precious metals, pyrometallurgy, hydrometallurgy, best available technologies, refining.*

#### Введение

Драгоценные металлы, включая золото, серебро, платину, палладий и родий, служат основой для ключевых отраслей: от ювелирного производства до высокотехнологичных применений в электронике и катализе. Их производство эволюционирует под давлением истощения легкодобываемых руд, роста техногенного сырья и требований наилучших доступных технологий (НДТ), направленных на минимизацию отходов и выбросов. В России за 2016-2019 годы наблюдается рост объемов выпуска этих металлов при одновременной консолидации производства у крупных холдингов с международной сертификацией. Цель статьи – обобщить ключевые методы производства драгоценных металлов на основе отраслевого справочника, акцентируя внимание на технологической комплексности, ресурсной эффективности и экологической адаптации.

#### Основная часть

##### 1. Сырьевая база и тенденции развития отрасли

Сырьевой базой современного производства драгоценных металлов служат как природные руды, так и техногенные материалы, что отражает переход от преимущественно добычной модели к ресурсосберегающей, ориентированной на замкнутые циклы. К природному сырью относятся золотосодержащие, серебросодержащие, медно-никелевые и платинометалльные руды, характеризующиеся разновидностями, где металл тонко вкраплен в сульфиды или ассоциирован с углеродистыми компонентами.

Важную роль приобретают вторичные ресурсы: анодные шламы, пыли и шлаки цветной металлургии, ломы и отходы электронной техники, использованные автокатализаторы, в которых сосредоточены значительные количества золота, серебра, платины, палладия и родия. В справочнике отмечается тенденция устойчивого роста доли переработки вторичного сырья и комплексных концентратов, что обусловлено как экономическими факторами, так и требованиями по сокращению техногенных отходов.

Статистические данные, свидетельствуют о постепенном увеличении объёмов производства золота, серебра и металлов платиновой группы в России за период 2016-2019 гг. на фоне стабилизации или умеренного роста мирового спроса.

##### 2. Общая структура технологических схем производства

Современные технологические схемы производства драгоценных металлов включают несколько последовательных стадий: подготовка и обогащение сырья, металлургическое извлечение металлов из концентратов, аффинаж до высоких проб и формирование товарной продукции. На стадии подготовки сырья выполняются операции дробления, измельчения, направленные на обеспечение оптимальной крупности материала для последующих процессов обогащения и выщелачивания.

Обогащение руд и концентратов основано на применении гравитационных, флотационных и иногда магнитных методов, позволяющих сконцентрировать драгоценные металлы и снизить массу перерабатываемого материала.

Дальнейшее извлечение драгоценных металлов реализуется преимущественно гидрометаллургическими методами, основанными на выщелачивании металлов из концентратов и руд в растворы с последующим осаждением, сорбцией или электролитическим выделением. Пирометаллургические процессы – плавка, конвертирование, обжиг – играют важную роль при переработке сульфидного сырья и при производстве металлов платиновой группы как попутных продуктов медно-никелевой металлургии. Заключительная стадия – аффинаж – включает химические и электрохимические методы доведения металлов до требуемой чистоты и формирования слитков, гранул или порошков.

### 3. Гидрометаллургические методы производства золота и серебра

Наиболее распространенным методом получения золота и серебра из руд и концентратов является цианидное выщелачивание, основанное на растворении металлов в щелочных растворах цианидов с образованием комплексных соединений. Кучное выщелачивание применяется для бедных руд и характеризуется сравнительно низкими капитальными затратами, при этом извлечение золота достигает 60-80% при длительных сроках выщелачивания. Резервуарное выщелачивание и схемы «уголь-в-пульпе» обеспечивают более высокие степени извлечения, часто превышающие 90%, за счёт интенсивного контакта пульпы с раствором и применения активированного угля или ионитов для сорбции золота непосредственно из пульпы.

Для упорных золотосодержащих руд, в которых драгоценные металлы заключены в сульфидной матрице или ассоциированы с углеродистыми компонентами, используются методы предварительного окислительного вскрытия: автоклавное окисление при повышенных температуре и давлении, бактериальное выщелачивание или обжиг. Эти процессы разрушают минералы-носители и переводят сульфидную серу в более стабильные формы, что существенно повышает эффективность последующего цианидного выщелачивания и снижает расход реагентов.

### 4. Производство металлов платиновой группы

Металлы платиновой группы (платина, палладий, родий, иридий, рутений, осмий) в промышленных масштабах в основном получают как попутный продукт переработки медно-никелевых и никелевых концентратов, а также при переработке вторичных катализаторов. На стадии пирометаллургии драгоценные металлы концентрируются в штейне и анодных шламах, образующихся при плавке и последующем электро-рафинировании основных металлов.

Дальнейшая переработка анодных шламов и концентратов осуществляется в основном гидрометаллургическими методами, включающими

растворение основных сопутствующих металлов и поэтапное выделение отдельных платиновых металлов за счёт различий их химических свойств. Для этого используются сложные комбинированные схемы, основанные на применении хлоридных и нитратных растворов, органических экстрагентов и ионообменных смол.

Процессы аффинажа МПГ включают последовательное селективное осаждение соответствующих комплексных соединений, их промывку, термическое разложение и восстановление до металлического состояния с получением высокочистых порошков или губчатых металлов. Требования к чистоте продукции для применения в каталитических системах, электронике и специальных сплавах чрезвычайно высоки, поэтому в технологические схемы широко внедряются методы электрорафинирования и тонкой химической очистки, обеспечивающие содержание примесей на уровне долей промилле.

### 5. Аффинаж и формирование товарной продукции

Аффинаж драгоценных металлов представляет собой заключительный этап производственного цикла, на котором достигается требуемая чистота металла, соответствующая международным стандартам и требованиям потребителей. Для золота это обычно содержание 99,95-99,99% и выше, для серебра – 99,9-99,99%, для платины и палладия – 99,95% и выше, что особенно важно для ювелирной и электронной промышленности.

В практике применяются различные методы аффинажа: химический и электрохимический. Например, для золота широко известны схемы электролитического аффинажа, в которых анодом служит сплав, содержащий золото и примеси, а катодом – чистое золото, осаждающееся из раствора при заданных параметрах потенциала и температуры. Для серебра распространён аффинаж в нитратных растворах с последующим осаждением и плавкой катодного металла.

Современные аффинажные предприятия характеризуются высоким уровнем автоматизации процессов, применением систем контроля pH, окислительно-восстановительного потенциала, концентраций компонентов в растворе, что повышает стабильность качества продукции и снижает риск технологических отклонений.

### 6. Экологические аспекты и наилучшие доступные технологии

Производство драгоценных металлов традиционно относится к экологически значимым видам деятельности из-за использования токсичных реагентов, образования газовых выбросов и твердых отходов. Именно поэтому развитие технологий идёт в тесной связи с концепцией НДТ, предусматривающей снижение удельного потребления энергии и реагентов, минимизацию выбросов, внедрение замкнутых водооборотных систем и переработку отходов.

Для пирометаллургических производств ключевыми мерами являются эффективные системы газоочистки, улавливания и утилизации сернистых газов с последующим производством серной кислоты, а также снижение выбросов оксидов азота и хлористых соединений до нормативных значений. В гидрометаллургии особое внимание уделяется регенерации и возврату в процесс цианидов, хлоридов и других реагентов, снижению объёма и токсичности.

#### **Заключение**

Современные методы производства драгоценных металлов представляют собой сложную систему взаимосвязанных гидро-, пиро- и электрометаллургических процессов, ориентированных на максимально полное извлечение металлов из разнообразных видов сырья при соблюдении жестких экологических требований. Развитие технологий характеризуется переходом от традиционных схем, ориентированных в основном на богатые руды, к комплексным решениям, включающим переработку упорных и техногенных источников, использование альтернативных выщелачивающих систем и глубокий аффинаж металлов.

Важнейшими тенденциями являются рост доли вторичного сырья, расширение применения автоклавных, сорбционных и экстракционных технологий, а также повышение степени автоматизации и цифровизации управления

производственными процессами. Всё более значимую роль играют НДТ, которые задают ориентиры по снижению выбросов и отходов, повышению энергоэффективности и рациональному использованию ресурсов, что в конечном итоге обеспечивает устойчивое развитие отрасли и укрепление её конкурентных позиций на мировом рынке.

#### **Список литературы**

1. Справочник по наилучшим доступным технологиям производства драгоценных металлов. ИТС 14-2020. Минприроды России.
2. Зайцев С.П. Производство драгоценных металлов. Глава 8 в Энциклопедии цветных металлов. М.: Изд-во АНО ИРЭ, 2010.
3. Карпов Ю.А. Проблемы аналитического контроля в производстве редких и драгоценных металлов // Цветные металлы. 2018. № 6.
4. Маркин А.В. Проблемы производства и экспорта драгоценных металлов в России // CyberLeninka. 2012.
5. Гончаров А.А. Рынок драгоценных металлов: тенденции и проблемы в России // Уральский федеральный университет. 2024.
6. Сидельников С.Б. Создание новых сплавов ювелирного назначения из многокомпонентных систем драгоценных металлов // CyberLeninka. 2015.

УДК 66.081, 546.3, 553

Микита А.А., Журавлева О.С.

### **Сравнительный анализ ключевых технологий извлечения лития и его соединений из попутных пластовых рассолов нефтяных месторождений**

Микита А.А. – магистр 1 курса; anya.grebenkina02@mail.ru

Журавлева О.С. - старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики, РХТУ им. Д.И. Менделеева; zhuravleva.o.s@muctr.ru;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*Статья посвящена сравнительному анализу технологий извлечения лития из попутных пластовых рассолов нефтяных месторождений как стратегически важного источника для Российской Федерации. Рассмотрены перспективные методы, основанные на электрохимическом осаждении, комплексной переработке и сорбции. Проведена оценка их технологических параметров, экономической эффективности и экологических рисков. Установлено, что использование гидроминеральных рассолов с применением существующей нефтегазовой инфраструктуры представляет собой наиболее рентабельный и экологически приемлемый путь создания отечественной сырьевой базы лития.*

*Ключевые слова: литий, попутные пластовые рассолы, нефтяные месторождения, технологии извлечения, сравнительный анализ, комплексная переработка, сорбция, гидроминеральные источники.*

### **Comparative analysis of key technologies for extracting lithium and its compounds from associated formation brines of oil fields**

Mikita A.A.<sup>1</sup>, Zhuravleva O.S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia.

*The article is devoted to a comparative analysis of technologies for extracting lithium from associated formation brines of oil fields as a strategically important source for the Russian Federation. Promising methods based on electrochemical precipitation, complex processing, and sorption are considered. An assessment of their technological parameters, economic efficiency, and environmental risks is conducted. It is established that the use of hydromineral brines with the application of existing oil and gas infrastructure represents the most cost-effective and environmentally acceptable path for creating a domestic lithium raw material base.*

*Key words: lithium, associated formation brines, oil fields, extraction technologies, comparative analysis, complex processing, sorption, hydromineral sources.*

#### **Введение**

Литий стал ключевым и стратегически важным ресурсом XXI века. Металлический литий и его соединения используются в современных технологиях, включая производство аккумуляторов для электромобилей, мобильных устройств и других энергетических систем. Спрос на этот элемент стремительно растёт, а геополитическая нестабильность и ограниченность традиционных источников повышают важность обеспечения стабильных, экономически и экологически эффективных способов его получения.

Российская Федерация на своей территории имеет несколько месторождений лития, в виде минералов, рассолов и глин. Но с учетом развитой нефтегазовой инфраструктуры, особый интерес представляют попутные пластовые рассолы нефтяных месторождений, содержащие литий в концентрациях, пригодных для промышленного извлечения. Ранее эти источники не обрабатывались, так как рассматривались как отходы добычи, но так как происходит рост спроса и необходимость импортозамещения приобретают новое стратегическое значение.

Целью данной статьи является сравнительный анализ существующих и перспективных технологий

извлечения лития из попутных пластовых рассолов нефтяных месторождений. Актуальность исследования обусловлена несколькими показателями. Первое, это рост глобального спроса на литий, по статистическим данным с 2018 по 2023 год потребление лития выросло более чем в два раза, по прогнозам такая тенденция сохранится, как минимум до 2035 года. Второе, до недавнего времени Россия на 90% зависела от импорта литиевого сырья из Чили, Аргентины и Китая, а из-за введённых международных санкций поставки значительно сократились, поставив под угрозу развитие отечественной промышленности. И третье, извлечение лития из попутных рассолов требует меньше капитальных затрат по сравнению с добычей из руд, так как используется уже существующая инфраструктура нефтегазовых месторождений.

#### **Экспериментальная часть**

Основные направления использования лития, распределение которых по объемам потребления показано на рисунке 1, охватывают широкий спектр высокотехнологичных отраслей. Абсолютно доминирующей сферой (более 60%) является производство литий-ионных аккумуляторов,

используемых для изготовления портативной электроники и электротранспорта [1].

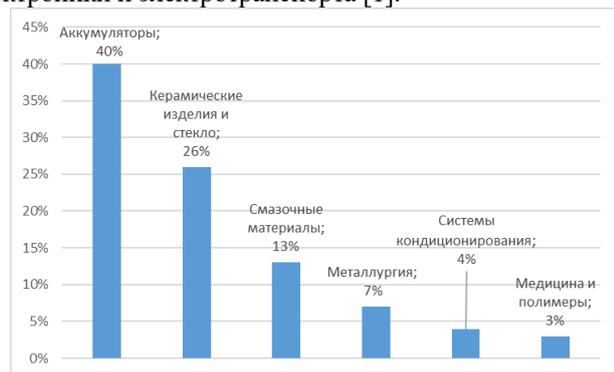


Рисунок 1 – диаграмма, отражающая примерное распределение использования лития и его соединений.

Значительная часть лития также используется в традиционных отраслях промышленности, где он выступает в роли модификатора свойств материалов. В керамике и стекле соединения лития (силикаты, карбонаты) снижают температуру плавления шихты и коэффициент теплового расширения, что позволяет производить термостойкую посуду, оптические стекла и стекловолокно [2]. В металлургии литий и его соединения применяются для рафинирования расплавов (связывание кислорода и водорода) [3], а также для создания легких и высокопрочных алюминий- и магниев-литиевых сплавов, востребованных в аэрокосмической индустрии [4]. В производстве пластичных смазок литиевые мыла выполняют функцию универсальных загустителей,

обеспечивающих стабильность в широком диапазоне температур и условий [5].

К другим важным, хотя и менее объемным, областям применения, как видно из представленной диаграммы, относятся: химическая промышленность (полимерные композитные электролиты) [6], системы кондиционирования (осушители на основе бромидов или хлорида лития) [7] и фармакология (соли лития в качестве нормотимических препаратов) [8]. Отдельного внимания заслуживает использование стабильных изотопов лития (литий-6) в ядерной энергетике и оборонном комплексе для получения трития и в качестве компонента термоядерного топлива [9].

На территории РФ добыча лития практически не ведется несмотря на то, что мы занимаем 8 место в мире по запасам лития (3,2% мировых запасов). Большую часть литиевого сырья Россия получает импортом. Однако, из-за геополитической напряженности, актуальность добычи лития на месторождениях в нашей стране растет с каждым днем, поэтому было запущено несколько крупных проектов по добыче данного сырья [10].

Несмотря на то, что гидроминеральные ресурсы лития в России прогнозируются или исследованы лишь частично, они составляют большую часть литиевой базы страны и включая глубокие рассолы и побочные воды нефтяных скважин, количественно превосходят рудные запасы. Они также обладают высокой потенциальной рентабельностью и находятся вблизи существующей инфраструктуры добычи нефти и газа.

Таблица 1. Сравнительный анализ источников лития в России

Параметр	Гидроминеральные источники (рассольные)	Рудные источники (сподуменовые руды)
Себестоимость добычи	4 – 5 тыс. долларов за тонну LC	5 – 8 тыс. долларов за тонну LCE
Инфраструктура	Использование существующих нефтяных скважин и инфраструктуры	Требуется строительство новых объектов
Сроки запуска проектов	5-7 лет при существовании инфраструктуры	Более 10 лет
Сопутствующие продукты	Возможность извлечения брома, йода, магния и других минералов	Ограниченные сопутствующие продукты
Экологическое воздействие	Меньше воздействия при использовании существующих скважин	Значительное воздействие из-за горных работ
Прогнозируемая добыча к 2040 году	До 600 тыс. тонн LCE в год	До 68 тыс. тонн LCE в год

Анализируя данные таблицы 1, можно отметить, что использование гидроминеральных (рассольных) источников лития в России демонстрирует более высокую экономическую и экологическую эффективность по сравнению с добычей из рудного сырья. Более низкая себестоимость, наличие готовой инфраструктуры нефтегазовых месторождений и существенно меньшее экологическое воздействие делают данный подход наиболее перспективным для наращивания отечественного производства литиевого сырья [11].

При этом важно подчеркнуть, что несмотря на то, что промышленная добыча лития из попутных нефтяных рассолов в России находится на начальном этапе, сами технологические решения в этой области развиваются уже давно. В мировой и отечественной практике накоплен значительный массив патентов и технологических разработок, ориентированных на извлечение лития из различных типов рассолов, включая геотермальные, подземные и производственные. Существенной задачей становится оценка применимости этих технологий к

специфике российских нефтяных рассолов, а также сравнительный анализ их эффективности, энергозатрат и экологичности.

В течение последнего десятилетия были разработаны различные перспективные технологии извлечения лития и его соединений из пластовых рассолов. Ниже представлены наиболее значимые из них.

### 1. Способ получения насыщенного рассола хлорида лития из пластовых вод нефтяных месторождений

Разрабатываемая технология извлечения лития из пластовых вод нефтяных месторождений основана на электрохимическом формировании двойного гидроксоалюмината лития  $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . На входе пластовая вода подвергается дозированной подаче щёлочи ( $\text{NaOH}$ ), что позволяет стабилизировать pH в диапазоне 7,5–8,5, необходимом для селективного связывания лития и предотвращения преждевременного осаждения кальция и магния. Далее вода проходит электрокоагуляционную обработку на алюминиевых электродах, в результате которой формируется нерастворимый комплекс и одновременно выделяется водород. После отделения и промывки горячей водой комплекс разрушается с высвобождением насыщенного  $\text{LiCl}$ -рассола, а гидроксид алюминия возвращается в начало процесса, обеспечивая цикличность и низкий расход реагентов [12].

Экологические риски технологии связаны прежде всего с возможным сбросом обеднённого рассола, содержащего остаточные концентрации лития, алюминия, натрия и хлоридов, а также с изменением показателя pH при неустойчивом дозировании щёлочи. Применение  $\text{NaOH}$  повышает риск локального перещелачивания и роста минерализации стоков, а также может способствовать вторичному осаждению кальциевых и магниевых соединений, увеличивая объём шламов. Образующийся при электролизе водород создает дополнительную нагрузку на систему промышленной безопасности, требуя эффективной вентиляции и минимизации взрывоопасных концентраций.

### 2. Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений

Разработанный способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений представляет собой многостадийную технологию, направленную на извлечение лития, рубидия, магния, йода и брома при сохранении качества воды для последующей закачки в пласт. После удаления механических примесей и нефти проводится декарбонизация воды католитным раствором  $\text{NaOH}$  до pH~9, позволяющая предотвратить сопутствующее осаждение кальциевых солей. Далее литий и рубидий извлекаются методом селективной сорбции, магний осаждается в виде гидроксида магния с использованием католита, а йод и бром выделяются путём кислой обработки, хлорирования и последующей десорбции. Важной особенностью является замкнутый цикл реагентов: часть очищенной

воды подвергают электролизу, получая  $\text{NaOH}$ , хлор и водород, которые далее используются для осаждения магния, регенерации сорбента, окисления иодидов и бромидов и синтеза соляной кислоты. Это обеспечивает высокую степень извлечения всех целевых компонентов (более 90 %) и минимизацию внешних химических реагентов [13].

Несмотря на высокую эффективность и экологически оправданную замкнутость реагентных потоков, технология характеризуется рядом экологических и промышленных рисков. Применение  $\text{NaOH}$ , как и в предыдущей технологии, на стадиях декарбонизации и осаждения магния создаёт опасность локального повышения pH, образования трудноудаляемых кальциевых осадков и увеличения минерализации сточных потоков. Электролиз попутной воды порождает водород и хлор — потенциально опасные газы, требующие строгого контроля концентраций, организации герметичных систем отвода, исключения образования взрывоопасных  $\text{H}_2$ -смесей и предотвращения утечек  $\text{Cl}_2$ . Дополнительные риски связаны с обращением с органическими растворителями при регенерации сорбента рубидия, образованием шламов  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  и  $\text{CaCO}_3$ , а также с необходимостью соблюдения нормативов по pH перед закачкой воды в пласт. В совокупности технология экологически устойчива при условии корректной работы электролизных установок, эффективной вентиляции и постоянного контроля pH, газовыделения и качества очищенной воды.

### 3. Пакетированный адсорбент для сорбции веществ из масло-, жиро-, нефтезагрязненной воды

Разработанная технология представляет собой пакетированную сорбционную систему для извлечения лития и других элементов из нефтезагрязнённых, жиросодержащих и техногенных рассолов. Основой решения является замкнутый водонепроницаемый пакет, заполненный мелкодисперсным адсорбентом, преимущественно на основе хлорсодержащей разновидности двойного гидроксида алюминия и лития ( $\text{DГАЛ-Cl}$ ), обладающего селективностью к ионам  $\text{Li}^+$ . Пакет выполняется из материала, поверхность которого становится несмачиваемой нефтепродуктами после пропитки водой, выполненный из тканых или нетканых полотен, стеклотканей, целлюлозных материалов. Такая конструкция предотвращает загрязнение адсорбента нефтью и жирами, поддерживает массообмен и обеспечивает высокие скорости фильтрации при турбулентных режимах. Небольшой размер частиц (< 2 мм) снижает диффузионные ограничения, а высокая пористость пакета (> 20 %) позволяет сохранять проницаемость даже при присутствии эмульгированных НП. Введение утяжелителей расширяет диапазон рабочих скоростей, устраняя проблему всплытия пакетов и обеспечивая ожигание слоя при высоких скоростях (до 70 м/ч). Экспериментальные данные подтверждают значительное повышение скорости

сорбции лития и устойчивость материала к загрязнению — при пористости ~40–55 % содержание нефтепродуктов в материале снижено до 0,2–0,5 %, что значительно превосходит традиционные мембраны [14].

Ключевые экологические риски связаны с попаданием в окружающую среду нефтепродуктов, извлечённых пакетами, а также с образованием вторичных отходов: отработанных фильтровальных пакетов, загрязнённых органическими веществами, и шламов после сорбции. Материалы пакетов (целлюлоза, стеклоткань, полиэфирные волокна) после насыщения НП требуют либо сжигания, либо многоступенчатой регенерации с использованием органических растворителей, что повышает экологическую нагрузку. Адсорбент на основе ДГАЛ-Cl содержит алюминий, и при разрушении гранул возможен перенос Al в очищенную воду. При обработке нефтезагрязнённых рассолов возможны образования устойчивых эмульсий и уноса микроразмерной нефти, а осадки, извлечённые сорбентом, классифицируются как отходы III–IV класса опасности. В целом технология обладает высокой технологической устойчивостью по отношению к нефтезагрязнениям и обеспечивает высокую эффективность извлечения лития, однако экологическая безопасность системы определяется качеством обращения с отработанными пакетами, объёмами нефтесорбционных остатков и стабильностью удержания алюминий-содержащего адсорбента.

#### 4. Способ сорбционного извлечения лития из литийсодержащих рассолов

Разработанный способ представляет собой усовершенствованную сорбционную технологию извлечения лития из природных и техногенных рассолов, основанную на использовании гранулированного хлорсодержащего двойного гидроксида алюминия и лития (ДГАЛ-Cl) в вертикальных сорбционных колоннах. Ключевой особенностью метода является предварительный слив остаточного рассола перед промывкой, а также проведение ускоренной отмывки насыщенного сорбента обессоленной водой со скоростью не менее 6 колоночных объёмов в час и в объёме 150–250 % от массы сорбента. Такая операция обеспечивает механическое вытеснение примесей щелочных и щелочноземельных металлов из межгранульного пространства без существенной десорбции лития. После быстрой отмывки проводится десорбция лития обессоленной водой в том же направлении потока, что и исходная сорбция, что создаёт хроматографический эффект и позволяет получить литиевый концентрат в форме хлорида лития, практически очищенный от кальция, магния, натрия, калия и сульфатов. Промывные воды с небольшим содержанием Li рециркулируются в поток исходного рассола, снижая потери лития с 7–12 % (в прототипах) до 3,6–5,2 %. Предложенный способ позволяет получить LiCl высокой чистоты без кислотной или

щелочной доочистки, что сокращает количество стадий и снижает потребность в реагентах [15].

Экологические риски технологии связаны, прежде всего, с образованием сточных вод после промывки сорбента и десорбции, которые содержат остаточные количества  $Li^+$ ,  $Al^{3+}$  (при разрушении гранул), крупных концентраций  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и сульфатов, отражающих общий солевой фон исходного рассола. Несмотря на отсутствие использования кислот и щелочей, что снижает токсичность процесса по сравнению с аналогами, повышенная минерализация промывных потоков требует аккуратного управления рециркуляцией и контроля накопления солей. Риски также включают образование мелкодисперсных алюмосодержащих частиц при истирании сорбента и требует тонкой фильтрации перед закачкой воды в пласт или сбросом. Повышенные концентрации натрия и хлоридов увеличивают массу сбрасываемых солей. С точки зрения обращения с отходами требуется утилизация отработанного сорбента — алюмосодержащий материал с остаточным LiCl может быть классифицирован как отход III–IV класса опасности. В целом технология отличается низкой химической токсичностью и сокращённым реагентным циклом, однако экологическая безопасность определяется стабильностью работы колонн, предотвращением истирания сорбента, эффективной рециркуляцией промывных вод и контролем минерализации сточных потоков.

#### 5. Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений

Разработанный способ представляет собой многостадийную технологию комплексной переработки попутных пластовых вод нефтяных месторождений, направленную на последовательное извлечение бора, магния, лития, йода и брома с последующей утилизацией очищенной воды в системе поддержания пластового давления. Технологическая схема включает предварительную очистку воды от нефти и механических примесей, затем экстракцию бора органическим экстрагентом с последующей реэкстракцией щёлочью, осаждение магния в виде гидроксида с получением товарной магнезии, извлечение лития через стадию образования гидроалюмината и последующее осаждение карбоната лития, ионнообменное извлечение йода и воздушную десорбцию брома. Ключевыми преимуществами технологии являются высокая степень извлечения компонентов (до 80–99,9%), получение товарных химических продуктов, повторное использование пластовой воды без потери её технологических свойств и сокращение объёма отходов нефтедобычи за счёт вовлечения попутных вод в переработку [16].

Экологические риски технологии связаны с образованием химически активных сточных вод после стадий подкисления, нейтрализации и окисления, возможными выбросами брома, аммиака и продуктов сжигания попутного нефтяного газа, а также накоплением шламов гидроксидов магния и алюминия. Несмотря на возврат основной массы воды

обратно в пласт, остаточные потоки с повышенной минерализацией требуют строгого контроля. В описании данной технологии не раскрыты вопросы утилизации отработанных сорбентов и шламов, долговременная стабильность водооборотного цикла

и интегральная углеродная нагрузка, что целесообразно дополнить при промышленном внедрении для полноценной экологической оценки технологии.

Таблица 2. Сравнительный анализ основных технологий извлечения лития и его соединений

Название технологии	Основной принцип извлечения лития	Ключевые особенности технологий	Преимущества	Недостатки	Экологическая оценка
Способ получения насыщенного рассола хлорида лития из пластовых вод нефтяных месторождений	Электрохимическое формирование двойного гидроксоалюмината лития $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ с последующим его разрушением для получения насыщенного раствора $\text{LiCl}$ .	- Использование электрохимической обработки на алюминиевых электродах. - Стабилизация pH щелочью ( $\text{NaOH}$ ) для селективности процесса. - Возврат гидроксида алюминия в цикл, снижающий расход реагентов.	- Высокая селективность к литию. - Замкнутый цикл реагентов ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ). - Относительно низкий расход химических реагентов.	- Риск перещелачивания и изменения pH. - Образование шламов ( $\text{Ca}$ , $\text{Mg}$ ). - Выделение водорода (взрывоопасность) - Сброс обеднённого рассола с остаточными загрязнениями.	- Шламы гидроксидов $\text{Ca/Mg}$ (осадки очистки воды) - 669,6 руб/т. - Хлориды ( $\text{Cl}^-$ ) в сточных водах - 202,0 руб/т.
Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений (многостадийная технология)	Многостадийный процесс с селективной сорбцией лития и рубидия, осаждением магния, выделением йода и брома.	- Замкнутый цикл реагентов: электролиз воды для получения $\text{NaOH}$ , $\text{Cl}_2$ , $\text{H}_2$ . - Извлечение нескольких ценных компонентов ( $\text{Li}$ , $\text{Rb}$ , $\text{Mg}$ , $\text{I}$ , $\text{Br}$ ). - Возможность использования очищенной воды для закачки в пласт.	- Высокая степень извлечения (>90%). - Минимизация внешних реагентов. - Комплексность (извлечение нескольких элементов). - Экологически устойчивый цикл при корректной эксплуатации.	- Использование опасных газов ( $\text{H}_2$ , $\text{Cl}_2$ ). - Риск локального повышения pH. - Образование шламов ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ ). - Необходимость строгого контроля за газами и pH.	- Выбросы хлора ( $\text{Cl}_2$ ) - 180 990 руб/т. - Шламы ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , $\text{CaCO}_3$ ) - 669,6 руб/т. - Солевой сток (минерализация) - 202 руб/т
Пакетированный адсорбент для сорбции веществ из масло-, жиро-, нефтезагрязнённой воды	Сорбция лития с использованием пакетов с мелкодисперсным адсорбентом на основе ДГАЛ-Cl, устойчивых к нефтезагрязнениям.	- Пакеты из несмачиваемых материалов, защищающих адсорбент от нефти. - Высокая скорость фильтрации и селективность к $\text{Li}^+$ . - Устойчивость к загрязнению нефтепродуктами.	- Эффективность в условиях сильного загрязнения нефтью. - Высокая скорость сорбции. - Простота эксплуатации и замены пакетов.	- Образование отработанных пакетов и шламов. - Риск попадания алюминия в воду. - Необходимость утилизации или регенерации пакетов.	- Отработанные пакеты с сорбентом, загрязнённые нефтепродуктами и >15% - 4 475,3 руб/т. - Летучие органические соединения (при регенерации) - 219,0 - 1 421,0 (в завис. от в-ва) руб/т

Название технологии	Основной принцип извлечения лития	Ключевые особенности технологий	Преимущества	Недостатки	Экологическая оценка
Способ сорбционного извлечения лития из литийсодержащих рассолов	Усовершенствованная сорбция с использованием гранулированного ДГАЛ-С1 в колоннах с предварительной промывкой для удаления примесей.	- Предварительная промывка для удаления примесей без десорбции лития. - Хроматографический эффект для получения чистого LiCl. - Рециркуляция промывных вод, снижающая потери лития.	- Высокая чистота продукта без кислотно-щелочной доочистки. - Низкие потери лития (3,6–5,2%). - Сокращение числа стадий и реагентов.	Образование сточных вод с высокой минерализацией. - Риск истирания сорбента и попадания алюминия в воду. - Необходимость утилизации отработанного сорбента.	- Отработанный гранулированный сорбент (ДГАЛ-С1 с остатками Li, Al) - 4 475,3 руб/т. - Промывные воды (повыш. минерализация) – 202 руб/т (Cl <sup>-</sup> ) 83,4 руб/т (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )
Способ комплексной переработки попутных вод нефтяных месторождений (извлечение В, Mg, Li, I, Br)	Многостадийный процесс с экстракцией, осаждением и ионным обменом для извлечения ряда компонентов.	- Последовательное извлечение бора, магния, лития, йода и брома. - Получение товарных химических продуктов. - Возврат очищенной воды в пласт.	- Высокая степень извлечения (80–99,9%). - Комплексность и получение товарной продукции. - Сокращение отходов нефтедобычи.	- Образование химически активных стоков. - Риски выбросов брома, аммиака. - Накопление шламов (гидроксиды Mg, Al). - Недостаточно раскрыты вопросы утилизации отходов.	- Шламы гидроксидов, хим. Осадки - 669,6 руб/т. - Аммиак (NH <sub>3</sub> ) (при нейтрализации) - 138,8 руб/т. - Выбросы брома (Br <sub>2</sub> ) - 180 990 руб/т

В таблице 2 представлен подробный сравнительный анализ пяти ключевых технологий извлечения лития и его соединений из попутных пластовых рассолов нефтяных месторождений. Каждая технология оценивается по основным параметрам: принципу извлечения, особенностям реализации, преимуществам, недостаткам и экологической оценке. На основании полученных данных можно сделать вывод о целесообразности выбора той или иной технологии в зависимости от условий эксплуатации и стратегических целей предприятия. Например, технологии с замкнутым циклом реагентов демонстрируют преимущество в снижении расходов и уменьшении экологического следа, тогда как сорбционные методы обеспечивают высокое качество конечного продукта и низкие потери лития. Этот анализ служит основой для обоснованного выбора оптимального технологического подхода при реализации проектов по добыче лития из попутных рассолов.

### Заключение

Проведенный анализ подтверждает стратегическую важность и высокую перспективность извлечения лития из попутных пластовых вод нефтяных месторождений России как экономически эффективного и экологически менее затратного пути обеспечения страны критически важным сырьём в условиях растущего глобального

спроса и необходимости импортозамещения. Сравнительный анализ технологий показывает, что наиболее целесообразными для внедрения являются комплексные многостадийные методы, позволяющие извлекать не только литий, но и другие ценные компоненты, при условии строгого контроля экологических рисков, связанных с образованием шламов, использованием реагентов и обращением с попутными газами. Успешная реализация данных проектов требует дальнейших исследований, адаптации технологий к специфике российских рассолов и создания эффективной нормативно-технической базы для их промышленного внедрения.

### Список литературы

1. Топ-10 направлений применения лития [Электронный ресурс] // Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ. – 2025. – URL: <https://issek.hse.ru/news/934588594.html> (дата обращения: 23.11.2025).
2. An overview on lithium applications [Электронный ресурс] / Stanford Advanced Materials. – 2024. – URL: <https://www.samaterials.com/content/an-overview-on-lithium-applications.html> (accessed: 23.11.2025).
3. Патент РФ № 2255997, 20.07.2005.
4. Антипов В. В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники //

Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-razvitiya-alyuminievyh-magnievyh-ititanovyh-splavov-dlya-izdeliy-aviatsionno-kosmicheskoy-tehniki> (дата обращения: 23.11.2025).

5. The role of lithium in the aging of lithium-ion batteries [Электронный ресурс] / P. Keil, A. Jossen // Journal of Power Sources. – 2016. – Vol. 307. – P. 135–142. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X16000578> (дата обращения: 23.11.2025).

6. Карпушкин Е.А., Лопатина Л.И., Дрожжин О.А., Сергеев В.Г. Твердые полимерные электролиты для литий-ионных аккумуляторов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2024. Т. 65. № 6. С. 513–525.

7. Литий в кондиционировании воздуха [Электронный ресурс] // SQMLITIO: [сайт]. – 2025. – URL: <https://sqmlitio.com/ru/productos/carbonato-de-litio/litio-en-aire-acondicionado/> (дата обращения: 23.11.2025).

8. Робинсон Маргарита Владимировна, Котлярова Анастасия Анатольевна, Шурлыгина Анна Вениаминовна, Рачковская Любовь Никифоровна,

Летягин Андрей Юрьевич. Механизмы действия соединений лития // Сибирский научный медицинский журнал. 2019. №5. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mehanizmy-deystviya-soedineniy-litiya> (дата обращения: 24.11.2025).

9. Почему Россия, наращивая запасы лития, никак не начнет его промышленную добычу // Российская газета. [Электронный ресурс] URL: <https://rg.ru/2025/02/14/pochemu-rossiia-narashchivaia-zapasy-litii-nikak-ne-nachnet-ego-promyshlennuiu-dobychu.html> (дата обращения: 24.11.2025).

10. ВЫГОН Консалтинг. Литий из рассолов: стратегическая опция для российских нефтегазовых компаний в условиях энергоперехода [Электронный ресурс]. URL: <https://vygon.consulting/tpost/x7tds7vhl1-litii-iz-rassolovstrategicheskaya-optsi> (дата обращения: 24.11.2025).

11. Патент РФ № 2837912, 07.04.2025.

12. Патент РФ № 2724779, 25.06.2020.

13. Патент РФ № 2797807, 22.03.2024.

14. Патент РФ № 2763955, 30.11.2023.

15. Патент РФ № 2189362, 20.09.2002.

УДК 661.715.7

Русакова А.А., Журавлева О.С., Савинков С.В.

## Анализ современных методов производства фенола в России и за рубежом

Русакова Арина Андреевна — студент; arya2004@yandex.ru

Журавлева Ольга Станиславовна — старший преподаватель кафедры логистики и экономической информатики; zhuravleva.o.s@muctr.ru

Савинков Сергей Валериевич – к.т.н., доцент кафедры логистики и экономической информатики; savinkov.s.v@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва

*В статье рассмотрены современные методы производства фенола в Российской Федерации и за рубежом. Проанализированы технологические особенности кумольного метода, являющегося доминирующим в мировой практике. Рассмотрены мероприятия по модернизации производств на примере российских компаний, а также рекомендации, которые предлагают Наилучшие Доступные Технологии, НДТ. Дана оценка перспективности альтернативных методов получения фенола и обоснована стратегическая целесообразность дальнейшего улучшения кумольного процесса для российской промышленности в среднесрочной перспективе.*

*Ключевые слова: фенол, кумольный метод, ацетон, модернизация производства, наилучшие доступные технологии (НДТ).*

### Analysis of modern methods of phenol production in Russia and abroad

Rusakova A.A., Zhuravleva O.S., Savinkov S.V.

D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia

*The article discusses modern methods of phenol production in the Russian Federation and abroad. The technological features of the cumulus method, which is dominant in world practice, are analyzed. The article considers measures to modernize production facilities using the example of Russian companies, as well as recommendations that offer the Best Available Technologies, BAT. An assessment of the prospects of alternative methods for producing phenol has been conducted, and the strategic feasibility of further improving the cumene process for the Russian industry in the medium term has been substantiated.*

*Keywords: phenol, cumulus method, acetone, modernization of production, best available technologies (BAT).*

### Введение:

Объем мирового рынка фенола в 2024 году оценивался в 11 миллионов тонн, и, по прогнозам, будет расти на 3,45% в год до 2035 года [1]. В промышленности фенол выпускается в виде белого кристаллического вещества. Он служит сырьем для получения фенолформальдегидных смол, поликарбонатов, эпоксидных смол, капролактама, термостойких полимеров, а также фармацевтических продуктов. Продукция на основе фенола имеет большое экономическое значение, поскольку, во-первых, используется для производства широкого спектра потребительских товаров и технологических материалов, таких как клеи, ламинаты, пропиточные смолы, сырье для лаков, эмульгаторы и моющие средства, пластификаторы, гербициды, инсектициды [2], во-вторых, обеспечивает занятость персонала на предприятии химического комплекса [3]. Актуальность исследования заключается в том, что технологическая сложность и экологические особенности традиционного производства фенола приводят к его постоянной модернизации, что требует сравнения существующих и альтернативных методов для оценки их целесообразности в современных условиях. Целью работы является сравнительный анализ современных методов производства фенола для выявления их достоинств, ограничений и области целесообразного применения.

Задачи исследования:

- 1) охарактеризовать текущее состояние и направления модернизации кумольного метода в России;
- 2) рассмотреть рекомендации НДТ, связанные с совершенствованием кумольного метода;
- 3) изучить современные зарубежные методы производства фенола;
- 4) выполнить сравнительную оценку технологий производства фенола для определения их применимости.

### Основная часть:

*Современные методы производства фенола в Российской Федерации*

В 2024 году российская промышленность произвела 245,1 тысячи тонн фенола — синтетического технического продукта, однако общий объем выпуска оказался ниже показателей предшествующего года примерно на 3,0% [4]. На российских предприятиях фенол производят кумольным методом, основанным на окислении изопропилбензола до гидропероксида изопропилбензола, с дальнейшим разложением и разделением продуктов ректификацией. Помимо фенола, на производстве совместно получают товарный ацетон и  $\alpha$ -метилстирол.

В рамках стратегии технического развития ГК «Титан» реализовала комплексный проект модернизации на заводе «Омский каучук» [5]. Целями проекта были не только оптимизация

технологического процесса, но и повышение экологических показателей предприятия.

В ходе модернизации производственного комплекса по выпуску фенола и ацетона, введенного в эксплуатацию в 2020 году, была произведена замена основного технологического оборудования на современные образцы отечественного производства. Применение нового оборудования обеспечивает эффективную тонкую очистку продукта от примесей, что позволяет выпускать фенол марки А, которая является высшей категорией качества. Результатом модернизации стало увеличение производственной мощности: объем выпуска фенола достиг 90 тысяч тонн в год, а ацетона — 56 тысяч тонн в год [5].

Параллельно с модернизацией основного производства осуществляется плановое обновление вспомогательной инфраструктуры. На текущий момент в цехе производства фенола и ацетона завершена установка станции налива гипериза (гидроперекиси изопропилбензола) проектной мощностью до 500 тонн в месяц. Гипериз — продукт окисления кумола кислородом. Это промежуточное вещество в производстве фенола и ацетона, которое широко востребовано в производстве пластмасс, лакокрасочных материалов, в топливной, нефтедобывающей и текстильной промышленности [6]. Конструкция новой станции позволяет отгружать продукцию в еврокубах и бочках, что повышает оперативность и экологическую безопасность логистических операций. Станция оснащена современным оборудованием отечественного производства, включая системы автоматического взвешивания и датчики контроля загазованности, что обеспечивает точный учет продукции на всех этапах отгрузки.

Другим крупным участником рынка является ПАО «Уфаоргсинтез» [6]. Ключевым этапом модернизации стала реконструкция сырьевого узла по производству кумола в 2016–2018 годах. В результате ввода в эксплуатацию обновленной установки изопропилбензола мощность выпуска кумола была увеличена до 170 тыс. тонн в год [7]. Особое значение имело внедрение высокоселективных цеолитных катализаторов на стадии алкилирования бензола пропиленом. Их нанопористая структура обеспечивает оптимальную диффузию реагентов, что позволяет резко сократить побочные реакции образования диизопропилбензола и тяжелых олигомеров [8]. Это приводит к снижению расхода сырья и энергозатрат, а также повышает регенерируемость самого катализатора. Данные улучшения повлияли на экономику и устойчивость всей фенольной цепочки за счет использования более чистого кумола на стадиях окисления и расщепления.

Также было достигнуто снижение удельного энергопотребления и повышение экологических показателей за счет сокращения отходов и диффузных выбросов на стадии алкилирования. На этапе разделения и очистки фенола применяется экстрактивная ректификация с диэтиленгликолем (ДЭГ). Этот метод реализован на двух

последовательно работающих под вакуумом ректификационных колоннах с последующей регенерацией ДЭГ в отдельной ректификационной колонне. Это позволяет эффективно удалять примеси, улучшая качество фенола и доводя его до товарных марок с меньшими энергозатратами по сравнению с классическими 8-ступенчатыми схемами [9].

Таким образом, «Уфаоргсинтез» сконцентрировал усилия на начальных стадиях процесса, модернизируя установку кумола и улучшая качество сырья, что стабилизирует последующие стадии производства фенола. В то же время ГК «Титан» акцентирует внимание на заключительных этапах и инфраструктуре фенольной цепочки, включая логистику гипериза и обновление оборудования фенол-ацетонового производства.

#### *Рекомендации НДТ*

Производство фенола кумольным методом относится к числу крупнотоннажных процессов, характеризующихся значительным объемом выбросов, образованием сточных вод и отходов, а также высоким уровнем энергопотребления. Наилучшие доступные технологии (НДТ), рекомендуемые для данной отрасли, направлены на снижение экологической нагрузки за счет оптимизации стадий окисления изопропилбензола, разложения гидропероксида, ректификационного разделения, а также совершенствования систем очистки газов и сточных вод.

Ключевой задачей НДТ является минимизация выбросов фенола, ацетона, изопропилбензола и  $\alpha$ -метилстирола, образующихся в ходе процессов окисления и ректификации. Согласно ИТС НДТ 18-2023, для передовых установок рекомендуемый уровень выбросов фенола составляет не более 0,13–0,16 кг/т продукции, ацетона — 0,27–0,66 кг/т, а углеводородов C1–C5 — до 0,97 кг/т [2]. Сокращение этих величин достигается за счет применения герметичных реакторов, улучшенной конденсации паров, использования систем абсорбции и адсорбции, возврата улавливаемых компонентов в технологический цикл и за счет оптимизации температурных режимов разложения гидропероксида.

В сточных водах основными загрязнителями являются фенол, сульфаты и органические вещества, характеризующиеся химическим потреблением кислорода (ХПК). НДТ предусматривают достижимые уровни: фенол — не более 0,052 кг/т, ХПК — до 8,17 кг/т, сульфаты — 3,68–10,06 кг/т. Для достижения этих показателей рекомендованы многоступенчатые схемы водоочистки, включающие механическое удаление примесей, биологическую очистку, сорбцию и доочистку на ионообменных смолах.

При производстве фенола образуются отработанные катализаторы (до 0,49 кг/т) и ионообменные смолы (до 0,61 кг/т). Рекомендуется их передача специализированным предприятиям для регенерации, извлечения драгоценных металлов и безопасного обезвреживания. Это позволяет исключить попадание

токсичных соединений в окружающую среду и повысить ресурсную эффективность производства.

Для повышения энергетической эффективности производства фенола целесообразно реализовывать меры, вытекающие из технологического описания кумольного процесса. Энергоемкость производства определяется тепловыми режимами окисления, концентрирования и разложения гидропероксида изопропилбензола, а также работой многоступенчатых ректификационных колонн. Ключевыми направлениями оптимизации являются снижение тепловых потерь оборудования, применение эффективных теплообменников и рекуперация тепла реакционных масс. Энергосбережение обеспечивается использованием тепла реакционной массы разложения для подогрева потоков алкилирования и нагрева оборотной воды, а также оптимизацией вакуумных режимов ректификации, что снижает количество тепловой энергии.

Отдельное направление улучшения связано с альтернативными технологическими решениями. Наиболее перспективной НДТ считается прямое окисление бензола до фенола с использованием оксидов азота ( $N_2O$ ) в присутствии цеолитных катализаторов. Процесс демонстрирует общий выход до 98%, минимальные побочные продукты и практически нулевые выбросы органических соединений. Хотя технология еще не внедрена в российскую промышленность в крупнотоннажном масштабе, НДТ рассматривают ее как ориентир для будущего развития отрасли, поскольку она позволяет отказаться от стадий получения и разложения гидропероксида кумола.

Таким образом, НДТ направлены на снижение удельных выбросов и сбросов, повышение энергоэффективности, сокращение образования отходов и улучшение экологической безопасности кумольного способа производства фенола.

#### *Современные методы производства фенола за рубежом*

Производство фенола за рубежом характеризуется широким спектром технологий, однако несмотря на развитие альтернативных процессов, именно кумольная технология доминирует на мировом рынке благодаря высокой селективности стадий, мягким условиям получения и выпуску фенола высокой чистоты. Развитие мирового рынка фенола во многом определяется ведущими лицензиарами технологий, среди которых PolimeriEuropa, Sunoco, UOP, KBR [10]. Их инновационные решения задают вектор развития современной отрасли, повышая ее рентабельность и снижая воздействие на окружающую среду.

Технология Polimeri Europa выделяется применением специализированного цеолитного катализатора PBE-1, обладающего повышенной селективностью к образованию кумола и минимизацией побочных реакций. Катализатор устойчив к дезактивации, обеспечивает глубокое переалкилирование полиизопропилбензолов, а само

производство фенола по данной схеме достигает очень высокой степени очистки готового продукта — до 99,99 % [11]. Технология отличается пониженным образованием примесей и возможностью работы в условиях минимального образования отходов.

Процесс Sunoco и UOP также относится к наиболее востребованным зарубежным технологиям кумольного метода. Его особенностью служит низкое давление в секции окисления, что повышает выход гидропероксида кумола и снижает энергетические и капитальные затраты. Применяются усовершенствованные схемы нейтрализации и разделения продуктов, позволяющие сократить образование побочных соединений. Процесс отличается низким удельным расходом сырья: 1,31 т кумола на 1 т фенола, без необходимости крекинга смол и рециркуляции ацетона. Технология очистки фенола также отличается тремя ключевыми особенностями: заменой азеотропной отпарки на химическую и ионообменную обработку, отсутствием системы нейтрализации кислот и наличием встроенных конденсаторов. Данные модификации снижают капитальные и эксплуатационные затраты и позволяют производить фенол высокой степени чистоты [11].

Технология KBR ориентирована на глубокую тепловую интеграцию, снижение энергопотребления и выпуск фенола и ацетона особо высокой чистоты (99,99% и 99,75% соответственно). Конструкция оборудования обеспечивает минимизацию расхода энергии на разделение потоков и контроль экологических параметров, что делает процесс одним из самых современных и энергоэффективных среди зарубежных аналогов.

Помимо кумольного процесса, за рубежом исследуются и применяются несколько альтернативных методов, имеющих свои технологические преимущества, но значительно уступающих по селективности, выходу и экономике. Метод Рашига основан на хлорировании бензола с последующим гидролизом хлорбензола. Его преимуществами являются отсутствие сопутствующего образования ацетона и возможность восстановления хлороводорода. Однако высокая коррозионная активность среды, образование нагаров на катализаторах и значительная энергоемкость процесса существенно ограничивают промышленное применение за пределами отдельных производств [12].

Еще одним методом альтернативного производства фенола является процесс окисления толуола. Он включает получение бензойной кислоты с последующей декарбоксилизацией до фенола. Хотя толуол менее токсичен, чем бензол, реакция отличается низкой селективностью, высокой степенью дезактивации катализаторов и образованием большого количества побочных продуктов. Доля этого метода на мировом рынке составляет лишь около 5 %, что подчеркивает его ограниченную конкурентоспособность относительно кумольного процесса [13].

Таким образом, зарубежные технологии производства фенола развиваются преимущественно в направлении совершенствования кумольного процесса и снижения его экологического и энергетического следа, в то время как альтернативные методы остаются либо экспериментальными, либо малораспространенными.

*Сравнительный анализ современных методов производства фенола*

Для систематизации данных и оценки различий между подходами выполнено их сопоставление по ключевым технологическим и эксплуатационным параметрам. Итоговое сравнение представлено в таблице 1, где отражены основные характеристики, которые определяют эффективность и применимость технологий.

Таблица 1. Сравнение современных методов производства фенола

Критерий	Российские модернизации кумольного процесса	Зарубежные кумольные технологии	Рекомендации НДТ (включая N <sub>2</sub> O-прямое окисление бензола)	Альтернативные методы
Чистота фенола	Повышенная чистота за счет тонкой очистки; получение фенола марки А	Очень высокая чистота до 99,99 %, минимальные примеси	Высокий выход и минимальные побочные продукты для прямого окисления бензола, но промышленно не подтвержден	Средняя, много побочных продуктов
Селективность процесса	Высокая селективность цеолитных катализаторов	Высокая селективность катализаторов (PBE-1, др.)	Теоретическая селективность до 98 %	Низкая селективность, образование побочных соединений
Энергоемкость	Снижена благодаря рекуперации тепла и оптимизации режимов	Низкая, глубокая тепловая интеграция	Направлена на снижение теплотерь и повышение энергоэффективности	Высокая энергоемкость
Экологические показатели	Снижение экологической нагрузки за счет модернизации стадий и систем очистки	Минимизация образования примесей, применение усовершенствованных схем нейтрализации и разделения	Строгие нормативы: выбросы фенола ≤0,13–0,16 кг/т, комплексная водоочистка	Высокое образование отходов, коррозионная среда
Катализаторы	Цеолиты высокой селективности	Катализаторы нового поколения (PBE-1) устойчивые к дезактивации	Цеолиты для прямого окисления бензола (N <sub>2</sub> O)	Дезактивация катализаторов (особенно в процессах окисления толуола)
Сырьевые и эксплуатационные затраты	Снижение расхода сырья и энергозатрат, более чистый кумол	Сниженные затраты за счет низкого давления и отсутствия рециркуляции ацетона	Акцент на тепловой эффективности	Высокая энергоемкость и эксплуатационная сложность
Гибкость и стабильность процесса	Стабильность стадий за счет улучшенного качества сырья	Высокая стабильность за счет минимизации побочных реакций и высокой селективности	Разрабатываемая технология, промышленная гибкость не подтверждена	Низкая стабильность, высокая коррозионность
Коммерческая применимость	Высокая: оптимально для крупных действующих производств	Очень высокая: распространенные мировые технологии	Перспективная, но пока без масштабного внедрения	Ограниченная: доля на рынке около 5 %
Общий вывод	Надежная модернизированная технология, подходящая для крупных предприятий	Высокоселективные и энергоэффективные реализации кумольного процесса	Ориентир на будущее развитие	Ограниченное применение; технологические недостатки значительны

**Заключение**

В ходе проведенного исследования был выполнен сравнительный анализ отечественных и зарубежных методов производства фенола с учетом современных тенденций развития промышленности. Решение поставленных задач позволило систематизировать технологические подходы, применяемые в России и за рубежом, а также рассмотреть рекомендации НДТ и альтернативные процессы.

Анализ российских модернизаций кумольного метода показал, что отечественные предприятия сосредоточены на повышении качества продукта, снижении энергозатрат и улучшении экологических параметров производства. Зарубежные реализации кумольного процесса отличаются более высокой степенью селективности, глубокой тепловой интеграцией и выпуском фенола высокой чистоты. Рассмотренные рекомендации НДТ указывают на направления технологического развития отрасли, включая снижение выбросов и повышение ресурсной эффективности. При этом метод прямого окисления бензола с использованием оксидов азота ( $N_2O$ ) выделяется как перспективное решение, но пока не внедренное промышленно. Анализ альтернативных технологий подтвердил их ограниченную применимость вследствие высокой энергоемкости, низкой селективности и эксплуатационных ограничений.

Сравнительное сопоставление методов показало, что кумольный процесс в его современных российских и зарубежных модификациях остается наиболее эффективным и коммерчески устойчивым способом получения фенола. Зарубежные технологии обеспечивают наибольшую селективность и качество продукта, тогда как отечественные модернизации демонстрируют прогресс в направлении повышения энергоэффективности и экологичности. Рекомендации НДТ задают вектор дальнейшего развития отрасли, а альтернативные процессы оправданы лишь в узкоспециализированных областях. Таким образом, проведенное исследование подтвердило значимость сравнительного анализа для оценки применимости различных методов и выявления технологических направлений, наиболее соответствующих современным требованиям промышленности.

**Список литературы**

1. Объем рынка фенола, доля, анализ, тенденции и прогноз на 2035 год [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.chemanalyst.com/industry-report/phenol-market-184> (дата обращения: 31.10.2025).
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям 18-2023 «Производство основных органических химических веществ». – М.: Бюро НДТ, 2023. – 558 с.
3. Кадровое обеспечение химического комплекса Российской Федерации в 2023 г / С. В. Савинков, О. С. Журавлева, В. М. Киселев, С. А. Филин // Химическая промышленность сегодня. – 2024. – № 6. – С. 2-7. – EDN ENEZCY.
4. Рынок фенола: текущая ситуация и прогноз 2015-2019 гг. [Электронный ресурс] // Alto Group. – URL: <https://alto-group.ru/otchet/rossija/445-rynok-fenola-tekushhaya-situaciya-i-prognoz-2015-2019-gg.html> (дата обращения: 31.10.2025).
5. ГК «Титан» модернизирует производство фенола и ацетона [Электронный ресурс] // Группа компаний «Титан». – URL: <https://titan-group.ru/press/news/gk-titan-moderniziruet-proizvodstvo-fenola-i-atsetona/> (дата обращения: 07.11.2025).
6. В ГК «Титан» смонтирована новая станция налива гипериза [Электронный ресурс] // Группа компаний «Титан». – URL: <https://titan-group.ru/press/news/v-gk-titan-smontirovana-novaya-stantsiya-naliva-giperiza/> (дата обращения: 07.11.2025).
7. В Башкирии модернизируют производство фенола и ацетона [Электронный ресурс] // РБК-Уфа. – 2025. – URL: <https://ufa.rbc.ru/ufa/freenews/5b03fd669a7947682a324169> (дата обращения: 14.11.2025).
8. Родионова Л. И., Князева Е. Е., Коннов С. В., Иванова И. И. Перспективы применения наноразмерных цеолитов в нефтехимии: синтез и каталитические свойства (обзор) // Нефтехимия. – 2019. – Т. 59, № 3. – С. 333–349. – DOI: 10.1134/S0028242119030134.
9. Технология производства фенола и ацетона кумольным способом [Электронный ресурс] // StudFiles. – URL: <https://studfile.net/preview/5761418/> (дата обращения: 14.11.2025).
10. Идрисова, Д. Р. Производство фенола: анализ рынка и технологий / Д. Р. Идрисова, Н. Д. Кулакова, И. Ф. Хисаметдинов // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2025. – № 2. – С. 61–67. – EDN YFCBWX.
11. Мейерс Р. Основные процессы нефтехимии / Р. Мейерс. – М.: Недра, 2015. – 700 с.
12. Способы получения фенолов [Электронный ресурс] // StudFiles. – URL: <https://studfile.net/preview/3718745/page:14/> (дата обращения: 22.11.2025).
13. Габитова, Г. Ж. Исследование производства фенола / Г. Ж. Габитова, В. П. Попов, Г. Б. Зиннохин // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2018. – С. 1961–1963.

УДК 669-1

Салимова О.С., Савинков С.В.

## Увеличение ресурса срока оборудования посредством нанесения цинк-никелевых покрытий

Салимова Олеся Сергеевна – студент; salimova.lesya2016@yandex.ru

Савинков Сергей Валериевич – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва.

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с повышением долговечности и коррозионной стойкости промышленного оборудования, а также обоснована эффективность применения цинк-никелевых (Zn-Ni) покрытий перспективной технологии для увеличения ресурса эксплуатации в агрессивных средах.*

*Ключевые слова: цинк-никелевое покрытие, гальванические покрытия, коррозионная стойкость, увеличение ресурса оборудования, защита металлов, агрессивные среды, технологический суверенитет.*

### Increasing the service life of equipment by applying zinc-nickel coatings

Salimova O.S., Savinkov S.V.

D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, 9 Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russia.

*The article discusses issues related to increasing the durability and corrosion resistance of industrial equipment, and substantiates the effectiveness of using zinc-nickel (Zn-Ni) coatings as a promising technology for increasing the service life in aggressive environments.*

*Keywords: zinc-nickel coating, electroplating, corrosion resistance, increasing the service life of equipment, metal protection, aggressive environments, technological sovereignty.*

#### Введение

В условиях санкционных ограничений и необходимости обеспечения технологического суверенитета Российской Федерации особую актуальность приобретают технологии, позволяющие существенно повысить долговечность отечественного оборудования и снизить зависимость от импортных защитных покрытий и комплектующих. Как отмечено в работе [1], химическая промышленность России должна перейти от инерционно-консервативного сценария развития к инновационному, ориентированному на глубокую переработку сырья и создание продукции с высокой добавленной стоимостью. Именно к таким материалам относятся современные коррозионно-стойкие гальванические покрытия, в первую очередь цинк-никелевые (Zn-Ni) сплавы, способные в 5–10 раз увеличить ресурс эксплуатации металлических конструкций и деталей в агрессивных средах: нефтегазовых, энергетических и транспортных отраслях.

Коррозия металлических деталей остается ключевой проблемой в современных промышленных условиях. Это особенно актуально для нефтеперерабатывающей отрасли, в авиа- и автомобилестроении, а также для энергетических объектов, так как выход оборудования из строя из-за коррозии может привести к серьезным последствиям.

Коррозия возникает в результате взаимодействия детали и узлов оборудования с окружающей средой. Факторами, ускоряющими этот процесс, являются влажность и температура, состав и концентрация агрессивных веществ, механические нагрузки и электрохимический потенциал металлов [2].

Разработка и практическое применение покрытий из гальванического покрытия Zn-Ni началось в 1980-х годах, и является широко используемым методом

гальванопокрытия в автомобильной, электронной, аэрокосмической, строительной, нефтегазовой и других отраслях промышленности [3].

#### Основная часть

Физические свойства цинк-никелевого покрытия, полученные в процессе обработки поверхности, при котором сплав наносится на поверхность детали, приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Физические свойства цинк-никелевого покрытия

Особенность	Цинк-никелирование
Состав	85-93% Цинк, 7-15% Никель
Коррозионная стойкость	До 1000 часов
Толщина покрытия	8-20 микрон
Температурное сопротивление	До 120°C (248°F)
Твердость	350-400 HV
Износостойкость	Отличная
Сопротивление окружающей среде	Высокая (соленая вода, химикаты)

Цинк-никелевые сплавы обладают повышенной долговечностью, устойчивостью к погодным условиям и химикатам. Также покрытие обладает свойством снижения трения, износа движущихся частей и электромагнитным экранированием, то есть обеспечивают электромагнитную защиту [4].

На Рисунке 1 представлены мелкие детали с нанесенным цинк-никелевым покрытием.



Рисунок 1. Детали с нанесенным цинк-никелевым покрытием

Процесс гальванического покрытия включает управление такими факторами, как плотность тока, температура и химия ванны. Эти факторы влияют на толщину, состав и качество покрытия, а также на эффективность покрытия и стоимость. Началом процедуры гальванизации цинк-никеля является подготовка поверхностей. Металлический предмет очищается и готовится для обеспечения хорошей адгезии цинк-никелевого покрытия. Это может

включать обезжиривание, промывание и активацию металлической поверхности. Этап подготовки критически важен для получения высококачественного и равномерного цинк-никелевого покрытия. Затем происходит кислотная активация для удаления оксидов и обеспечения равномерной адгезии пластины. Затем металлический предмет помещается в раствор цинк-никеля для гальванизации, и подается электрический ток. Плотность тока обычно поддерживается в диапазоне 1-5 А/дм<sup>2</sup>, а температура ванны поддерживается на уровне 20-35°C. После нанесения покрытия производится промывка для удаления остатков раствора. Затем детали подвергаются термообработке в водородной среде при температуре 180–220 °С в течение 2–24 часов, особенно это касается высокопрочных сталей. После этого проверяются толщина, состав и внешний вид покрытия [4-5].

Цинк-никелевое покрытие, по сравнению с обычным цинком, обеспечивает в 5-10 раз более длительную защиту от коррозии. Его более высокая твердость обеспечивает большую износостойкость, чем у цинк-железо и цинк-кобальт [5]. Сравнение цинк-никелевого покрытия с традиционными покрытиями из цинка и цинковых сплавов приведено в Таблице 2.

Таблица 2. Сравнение цинк-никелевого покрытия с традиционными покрытиями из цинка и цинковых сплавов

Тип покрытия	Коррозионная стойкость	Относительная стоимость	Твердость (HV)
Цинк-никель (12-15% Ni)	720-100	Высокая	350-450
Цинк-железо (0,3-0,8% Fe)	240-360	Средняя	150-200
Цинк-кобальт (0,5-1,0% Co)	360-480	Средневысокая	200-300
Обычный цинк	96-240	Низкая	50-100

Повышенная коррозионная устойчивость сплава гарантирует, что компоненты будут выдерживать суровые условия, продлевая срок службы продукции и снижая затраты на техническое обслуживание. Кроме того, улучшенные механические и электрические свойства сплава повышают производительность и функциональность продукции, а также снижают их вес и стоимость. Наконец, экологичность сплава соответствует нормативным и социальным требованиям к более экологичной и безопасной продукции, а также снижает воздействие на окружающую среду.

Крупные автопроизводители, такие как Ford, General Motors и Toyota используют цинк-никелевые покрытия для своих важнейших компонентов, признавая их преимущества в плане долговечности и эксплуатационных характеристик, особенно в сложных условиях, таких как солевой туман, тормозная жидкость и высокие температуры [6-7].

Применение Zn-Ni покрытий значительно увеличивает ресурс оборудования. Например, оно используется для защиты компонентов авиационной техники, таких как системы вооружения, транспортных средств и самолетов от

коррозии, износа и высоких температур. Гальваническое Zn-Ni покрытие также может повысить прочность металлических деталей, а также снизить вес и стоимость авиационного оборудования. Также оно применяется для защиты строительных материалов, таких как арматура, дорожные ограждения и крепежные элементы от коррозионного износа. Покрытие может повысить надежность и безопасность нефтегазовых операций, а также снизить эксплуатационные и экологические риски в нефтегазовой отрасли. В тяжелой технике (экскаваторы, комбайны) покрытия защищают от химических реагентов, увеличивая межремонтный период на 2-3 года [7]. В целом, Zn-Ni покрытия снижают затраты на обслуживание на 15–25% за счет продления ресурсов [8-9].

#### Заключение.

Нанесение Zn-Ni покрытий представляет собой эффективный метод увеличения ресурса срока оборудования, обеспечивая комплексную защиту от коррозии, преждевременного износа и термических нагрузок. Благодаря оптимальному содержанию никеля (12-15%) также покрытия обеспечивают в 5-10

раз более высокую коррозионную стойкость по сравнению с традиционным цинкованием, сохраняя при этом отличную адгезию, повышенную твердость (350-450 HV) и износостойкость. Это позволяет увеличить ресурс эксплуатации деталей и узлов в агрессивных средах: в нефтегазовой отрасли, автомобильной и авиационной промышленности, энергетике и морском хозяйстве.

Применение цинк-никелевых покрытий не только продлевает срок службы оборудования, но и дает ощутимый экономический эффект: снижает частоту и объемы ремонтных работ, уменьшает простои техники и общие эксплуатационные затраты. Дополнительным преимуществом являются экологичность процесса (возможность использовать щелочные электролиты с меньшим содержанием токсичных компонентов). Внедрение данной технологии позволяет не только решить актуальную проблему коррозионного разрушения, но и получить конкурентные преимущества за счет снижения массы защищаемых конструкций и общей экономии жизненного цикла оборудования.

#### Список литературы

1. Савинков С.В. Перспективы развития российского химического и нефтегазохимического комплекса // Тенденции развития науки и образования. – 2023. – doi: 10.18411/trnio-02-2023-173.
2. Основные причины коррозии металлов: как предсказать и предотвратить // РосСтип: промышленный интернет-журнал. – URL: <https://rosstip.ru/news/2731-osnovnye-prichiny-korrozii-metallor-kak-predskazat-i-predotvratit> (дата обращения: 10.11.2025).
3. Никелирование цинка [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.plasticmold.net/ru/тег/никелирование-цинка/> — (дата обращения: 10.11.2025).
4. Zinc Nickel Alloys: The Complete Guide [Электронный ресурс] // PAVCO. – URL: <https://pavco.com/blog/zinc-nickel-alloys> (дата обращения: 10.11.2025).
5. Zinc Nickel Plating [Электронный ресурс] // Sintered Filter. – URL: <https://www.sinteredfilter.net/zinc-nickel-plating/> (дата обращения: 10.11.2025).
6. Zinc Nickel Electroplating: A High-Performance Solution for Metal Protection [Электронный ресурс] // J&M Plating. – URL: <https://www.jmplating.com/blog/2024/2/27/zinc-nickel-electroplating-a-high-performance-solution-for-metal-protection> (дата обращения: 10.11.2025).
7. Zinc coating // ScienceDirect: [электронный ресурс]. – Elsevier, 2024. – (Materials Science). – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/zinc-coating> (дата обращения: 28.11.2025).
8. Zinc Coating - an overview // ScienceDirect Topics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/zinc-coating> (дата обращения: 28.11.2025).
9. Nickel Coating - an overview // ScienceDirect Topics [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/nickel-coating> (дата обращения: 28.11.2025).

УДК 658.345

Бредихина К.А., Манюкова И.И.

### **Математические методы оценки коллективных социальных рисков в условиях нефтехимического производства**

Бредихина К.А. – аспирант 1 курса кафедры логистики и экономической информатики, электронная почта bredikhina.kristina.a@yandex.ru;

Манюкова Ирина Игоревна – доцент кафедры логистики и экономической информатики, ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

*В статье рассмотрены проблемы оценки социальных рисков на объектах нефтехимической промышленности. Представлен расчет энергетического потенциала взрывоопасности. Проведен анализ взрывоопасности технологического блока с ректификационной установкой в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности №533. Показано, что определение энергетического потенциала взрывоопасной среды и расчет избыточного давления во фронте ударной волны обеспечивает достоверную оценку рисков и моделирование рисков при проектировании и эксплуатации нефтехимических объектов.*

*Ключевые слова: аварийная ситуация, промышленная безопасность, оценка рисков, социальный риск, ударная волна, энергетический потенциал.*

### **Mathematical methods of collective social risks assessing in the context of petrochemical production**

Bredikhina K.A., Manyukova I.I.

D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

*The article discusses the problems of social risks assessing at petrochemical facilities. The calculation of the energy potential of explosion hazard is presented. An analysis of the explosion hazard of a process block with a distillation unit was carried out in accordance with Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety No. 533. It is shown that determining the energy potential of an explosive atmosphere and calculating the overpressure at the shock wave front ensures a reliable risk assessment and risk modeling in the design and operation of petrochemical facilities.*

*Keywords: accident situation, industrial safety, risk assessment, social risk, shock wave, energy potential.*

#### **Введение**

Нефтехимическая промышленность является одной из ключевых отраслей современной экономики, обеспечивающей производство широкого спектра продукции - от базовых химических веществ до сложных полимерных материалов. Технологический процесс нефтехимического производства характеризуется высокой степенью опасности, связанной с использованием взрывопожароопасных веществ и сложных технологических процессов [1, 2]. Наиболее распространенный процесс на нефтехимическом производстве является термический пиролиз газообразных и жидких углеводородов с водяным паром в трубчатых печах.

Цель работы заключается в разработке комплексной методики оценки коллективных социальных рисков на объектах нефтехимического производства. Исследование направлено на определение энергетического потенциала взрывоопасности технологических блоков и оценки возможных последствий аварийных ситуаций для персонала и населения прилегающих территорий.

Объектом исследования является производство низших олефинов, которые выступают базовым сырьём для синтеза таких важнейших полимеров, как полиэтилен и полипропилен. Актуальность исследования определяется двумя

ключевыми факторами: высокой энергоёмкостью производственных процессов и существенными рисками взрыво- и пожароопасности, требующими оптимизации.

В рамках данного исследования для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач, обеспечивающих системный подход к анализу проблемы: провести детальный технологический анализ производства низших олефинов с целью выявления критических участков и потенциальных рисков производственного процесса, рассчитать энергетический потенциал взрывоопасности технологических блоков с определением массы вовлеченных веществ и избыточного давления во фронте ударной волны, провести оценку социальных рисков для персонала и населения прилегающих территорий при возможных аварийных ситуациях.

Достижение поставленной цели позволит повысить уровень промышленной безопасности на нефтехимических предприятиях и разработать эффективные превентивные меры для предотвращения возможных аварий и снижения их последствий.

#### **Основная часть**

Был проведен анализ технологической схемы производства олефинов из бензиновой фракции, на основании которого установлено, что

ректификационная установка деэтанализации взрывоопасна [3]. Для определения энергетического потенциала взрывоопасности блока ректификации проведен расчет в соответствии с Приложением 2 к ФНП № 533 от 15 декабря 2020 года «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [4].

Расчет включает определение энергетического потенциала взрывоопасной среды, оценку массы вовлеченного в процесс вещества и расчет избыточного давления во фронте ударной волны [4].

Энергетический потенциал взрывоопасности  $E$  (кДж) блока равен:

$$E = E'_1 + E''_1 + E''_4, \quad (1)$$

где  $E'_1$  – сумма энергий адиабатического расширения  $A$  (кДж) и сгорания ПГФ, находящейся в блоке,  $E''_1$  – энергия сгорания ПГФ, образующейся за счет энергии перегретой жидкой фазы (ЖФ), имеющейся в блоке,  $E''_4$  – энергия сгорания ПГФ, образующейся из пролитой на твердую поверхность ЖФ.

Установлена категория взрывоопасности технологического блока, включающего ректификационную колонну объемом 47 м<sup>3</sup>, содержащую смеси углеводородов C2 – C3, с расчетными значениями  $m=3415$  кг,  $Q_v=33$  [5,6,7], по представленным данным в таблице 1, технологический блок относится к II категории взрывоопасности [3].

**Таблица 1.** Показатели взрывоопасности технологических блоков

Категория взрывоопасности	$Q_v$	$m$ , кг
I	$> 37$	$> 5000$
II	$27 - 37$	$2000 - 5000$
III	$< 27$	$< 2000$

Расчет последствий взрыва ректификационной колонны проведен по методике, описанной в приложении 3 к ФНП № 533 от 15 декабря 2020 года «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [4].

Избыточное давление  $\Delta P_{\phi}$  (кПа) на фронте ударной волны, образующейся при взрыве ПГВ облака, равно:

$$\Delta P_{\phi} = 81 \frac{m_{\text{пр}}^{1/3}}{R} + 303 \frac{m_{\text{пр}}^{2/3}}{R^2} + 505 \frac{m_{\text{пр}}}{R^3}, \quad (2)$$

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{v,r}}{Q_{v,\text{гнт}}} \cdot m \cdot Z, \quad (3)$$

где,  $m_{\text{пр}}$  – приведенная масса пара или газа, участвующих во взрыве, кг;  $R$  – расстояние от эпицентра взрыва, м;  $Q_{v,r}$  и  $Q_{v,\text{гнт}}$  – соответственно, энергии взрыва газа (пара) и тротила (тринитротолуола), кДж/кг;  $Z$  – коэффициент участия горючих газов и паров в горении, принятый равным 0,1.

Масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство:

$$m = G'_1 + G_{\text{п}} + G''_5 = 1163,82 + 924,35 + 1228,85 = 3317,02 \text{ кг} \quad (4)$$

Энергия взрыва газа (пара):

$$Q_{v,r} = 0,3 \cdot 52000 + 0,4 \cdot 50000 + 0,1 \cdot 48000 + 0,2 \cdot 45700 = 49540 \text{ кДж/кг} \quad (5)$$

Приведенная масса пара или газа, участвующих во взрыве:

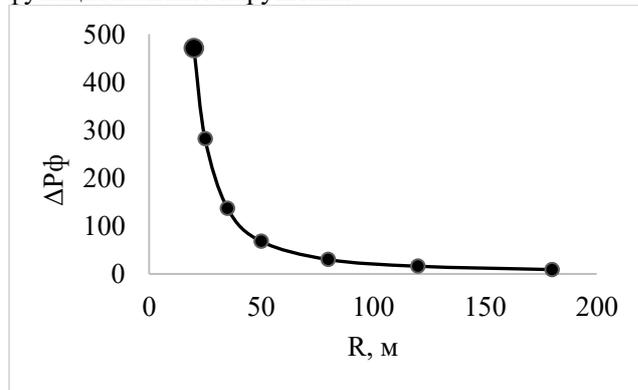
$$m_{\text{пр}} = \frac{49540}{4520} \cdot 3317,02 \cdot 0,1 = 3636 \text{ кг} \quad (6)$$

Результаты воздействия избыточного давления во фронте ударной волны на жизнедеятельность человека, представленные в таблице 2, были получены при моделировании ситуаций с различными расстояниями от источника ударной волны.

**Таблица 2.** Влияние радиуса разрушения и избыточного давления ударной волны на жизнедеятельность человека

$R$ , м	$\Delta P_{\phi}$ , кПа	Результаты воздействия
20	471	Безусловное летальное поражение
25	282	Летальный исход в 50% случаев
35	137	Летальный исход в 50% случаев
50	68	Среднее поражение
80	30	Легкое поражение
120	16	Легкое поражение
180	9	Безопасно для человека

На основании полученных расчётных данных был построен график (рис. 1), отображающий зависимость величины избыточного давления от расстояния до источника ударной волны. График наглядно демонстрирует, как снижается интенсивность воздействия с увеличением дистанции: в ближней зоне фиксируются критические значения давления, способные привести к тяжёлым травмам или летальному исходу, тогда как на больших расстояниях уровень давления уменьшается до величин, вызывающих лишь лёгкие функциональные нарушения.



**Рис. 1.** Зависимость избыточного давления  $\Delta P_{\phi}$  от расстояния эпицентра взрыва  $R$

Таким образом для повышения производственной безопасности на нефтехимических производствах, необходимо учитывать и контролировать настройки нагрева (возможные скачки напряжения, открытый огонь, перегрев куба), закупорки трубок, переполнение куба, отсутствием вентиляции или негерметичности соединений, данные нарушения технологического процесса приводят к резкому повышению давления в системе и взрыву ректификационной колонны. Расчеты энергетического потенциала взрывоопасности технологических блоков выявляют критических участков и потенциальных рисков производственного процесса.

Модернизация оборудования и оптимизации условий процесса: рост температур и сокращение времени контакта сырья с паром повышают энергосурсоэффективность и экологичность технологического процесса [8,9,10].

#### Заключение

Показано, что проведенная оценка коллективных социальных рисков на производстве низших олефинов определила ректификационную установку дезтанизации, как наиболее опасный объект II категории взрывоопасности. Расчеты в соответствии с Федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности: «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» позволяют моделирование рисков при проектировании и эксплуатации нефтехимических объектов.

#### Список литературы

1. Климентова, Г. Ю. Технологии повышения экологичности производств нефтепереработки и

нефтехимии / Г. Ю. Климентова, М. В. Журавлева. — Казань: КНИТУ, 2022. — 120 с.

2. Тихомиров Н. П., Потравный И. М., Тихомирова Т. М. — Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2017. — 350с.

3. Бесчастнов, М. В. Промышленные взрывы. Оценка и риск / М. В. Бесчастнов. — Москва: Химия, 1991. — 432 с.

4. ФНП № 533 от 15 декабря 2020 г. «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств».

5. Смидович, Е. В. Технология переработки нефти и газа. Крекинг и пиролиз / Е. В. Смидович. — Москва : Недра, 2021. — 384 с.

6. Иванов, А. А. Каталитические процессы в нефтехимии / А. А. Иванов, В. Г. Петров. — Казань : Казанский университет, 2020. — 296 с.

7. Александров, И. А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке / И. А. Александров. — Москва : Химия, 1981. — 352 с.

8. Meshalkin, V. P. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering / V. P. Meshalkin, V. G. Dovi, V. I. Bobkov, A. V. Belyakov, O. B. Butusov, A. V. Garabadzhiu, T. F. Burukhina, S. M. Khodchenko // Mendeleev Communications. — 2021. — Vol. 31, № 3. — P. 593–604.

9. Мешалкин, В. П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем / В. П. Мешалкин. — Смоленск: ООО «Принт-экспресс», 2021. — 442 с.

10. Кафаров, В. В. Обеспечение и методы оптимизации надежности химических и нефтеперерабатывающих производств / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Г. Грун, В. Нойманн. — Москва: Химия, 1987. — 272 с.

УДК

Ярышева Д.Л., Савинков С.В.

## Цифровизация и проблемы сбора персональных данных в химической отрасли

**Ярышева Дарья Леонидовна** – студент 3 курса кафедры рекламы, связей с общественностью и дизайна, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Россия, Москва, 115054, Стремянный пер., д.36; dyrshv@ya.ru

**Савинков Сергей Валериевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры логистики и экономической информатики, ФГБОУ ВО Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.; доцент кафедры рекламы, связей с общественностью и дизайна, ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова», Россия, Москва, 115054, Стремянный пер., д.36; sergey-v-savinkov@ya.ru

*В статье обсуждается важный для освоения процесса цифровизации в сфере химической отрасли и других отраслей реального сектора экономики России вопрос о сборе и использовании персональных данных с сайтов компаний и др. электронных ресурсов. Показаны основные причины, вызывающие доверие и недоверие к компаниям, при обращении к которым требуется вводить персональные данные пользователей на специальных страницах сайтов. Даны простые рекомендации для исправления негативно влияющих на восприятие пользователей факторов.*

**Ключевые слова:** цифровизация химической отрасли, персональные данные, сбор персональных данных

## Digitalization and the problems of personal data collection in the chemical industry

Iarysheva D.L.<sup>1</sup>, Savinkov S.V.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses the issue of collecting and using personal data from company websites and other electronic resources, which is important for mastering the process of digitalization in the chemical industry and other sectors of the real sector of the Russian economy. The main reasons for trust and distrust of companies that require users to enter their personal data on special website pages are shown. Simple recommendations are given to correct the factors that negatively affect the perception of users.*

**Keywords:** digitalization of the chemical industry, personal data, collection of personal data

**Введение.** Цифровизация химической отрасли как в производстве, так и в сфере базовых научно-технологических разработок [1] связана со сложными технологическими процессами и строгими стандартами безопасности [2]. В цифровое пространство компаний заносится информация и формируются онлайн-каталоги, автоматизируются закупки, внедряются системы клиентского взаимодействия. С одной стороны создаются условия для беспрепятственного коммуникационного обмена, полезного для обобщения опыта и научных изысканий, с другой – возникают новые для традиционного рынка проблемы, связанные с защитой персональных данных в условиях обостряющейся конкурентной борьбы [3].

В химической промышленности, как и во всех отраслях реального сектора экономики, предоставление персональных данных приобретает особую специфику, поскольку контактная информация связана не с конечным потребителем, а с представителем компании – лицами, принимающим решение: руководителями разного уровня, а также инженерами, технологами, закупщиками и т.д. Компании работают в условиях устойчивой цифровизации, и значение персональных данных (далее – ПД) растет на разных уровнях взаимодействия с клиентами. Понятие персональной информации расширяется, развивается и постепенно охватывает все больше сфер. Многие организации

стремятся выстраивать доверительные и долговременные отношения с потребителями, опираясь на контактные сведения, полученные при коммуникации. За счет этого удается усиливать маркетинговые стратегии и повышать их результативность. Однако усиление норм, регулирующих обработку ПД, создает риски, связанные с конфиденциальностью и безопасностью.

Целью исследования является анализ основных причин, по которым сбор ПД необходим в химической отрасли, а также выявление затруднений, возникающих у компаний при получении и использовании этой конфиденциальной информации.

### Результаты и обсуждение

В зарубежной и отечественной литературе регулярно обсуждают вопрос сбора ПД клиентов. Исследования проходят в двух направлениях: рассматриваются теоретические аспекты формирования отношений компаний с клиентами [4] и коммуникационное взаимодействие в рамках коммерческого подхода [5], в котором авторы прослеживают развитие теории маркетинга отношений от ее появления в 1980-х годах до современного этапа и дальнейших направлений продвижения. Основной акцент сделан на длительных связях с клиентами и значимости контактов, создающих выгоду для обеих сторон.

Обсуждение преимуществ сбора персональных данных нередко сопровождается

противоположной линией рассуждений, где исследователи концентрируются на рисках с описанием механизма использования персональных и контактных сведений компаниями в корыстных целях с использованием полученной информации как инструмента влияния и манипулирования [6]. Формирование поведения клиентов меняется под давлением скрытых механизмов воздействия, и приватность постепенно теряет устойчивые границы.

Права участников коммуникаций в отрасли попадают под угрозу, что требует обязательного соблюдения этичности и прозрачности, хотя интерпретация этих принципов разными компаниями заметно колеблется. Актуальность обсуждения возрастает: вступление новых норм усилило контроль. В Европе действуют нормы GDPR [7], в России – Федеральный Закон №152-ФЗ «О персональных данных» [8]. Переключение между требованиями разных юрисдикций создает дополнительное напряжение в сфере регулирования, и понимание правил складывается не сразу.

Обсуждение правовых требований, связанных со сбором персональных данных выстраивается вокруг обязанности продавца соблюдать конфиденциальность сведений [9]. Основанием служит Федеральный Закон №152-ФЗ «О персональных данных», содержащий в себе несколько основных принципов: законность, справедливость, прозрачность, ограничений цели, минимизация данных, точность, ограничение сроков хранения информации, целостность, конфиденциальность и подотчетность. Следовательно, сбор информации допустим при условии соблюдения вышесказанных норм, однако юридические ограничения формируют сложную систему, где интерпретация требований нередко вызывает разногласия.

Практика бизнеса продолжает опираться на ПД. Персонализация выступает рабочим инструментом, через который компании выстраивают контакт с клиентом и уточняют формат взаимодействия. Логика действий меняется: акцент смещается на индивидуальные настройки коммуникации.

Предложений на рынке много, и на фоне насыщенности персонализированные способы удержания внимания дают компании конкурентное преимущество. Связь с клиентом становится точнее, а механизмы поддержки интереса приобретают прикладной характер.

Использование ПД усиливает аналитический потенциал компаний, однако движение аргументов редко выглядит линейным. Исследовательские работы в области привлечения потребителей к той или иной проблеме фиксируют устойчивую тенденцию: персонализированные предложения сопровождаются ростом конверсии и уменьшением оттока клиентов. Эффект проявляется заметнее при работе не только с контактными сведениями. В ход идут история покупок, предпочтения потребителей, элементы поведения в цифровой среде. На основе

перечисленного формируются рекомендации, ориентированные на индивидуальный интерес, а настройка коммуникации приобретает более тонкий характер.

Интернет-торговля демонстрирует прикладное использование контактных сведений. Рассылки со скидками и предложениями активизируют коммуникацию, а вероятность покупки возрастает. Действия внутри цепочки взаимодействия развиваются неравномерно, с паузами и рывками. Общий ориентир сохраняется: поддержание устойчивого контакта с потребителем и удержание внимания в процессе взаимодействия.

Инструмент персонализации помогает удерживать внимание аудитории, корректировать и усиливать воздействие кампаний. Рабочие процессы проходят оптимизацию, когда предложения приближаются к интересам потребителя, а набор решений становится точнее. Клиентский опыт получает дополнительные элементы удобства, и динамика продаж ускоряется. Структура этих процессов выглядит неоднородной, однако общий вектор указывает на устойчивую значимость персональных данных для компаний.

Опасения пользователей формируют одну из самых трудных зон при обращении компаний к ПД. Исследование ВЦИОМ показывает масштаб проблемы: «68% интернет-пользователей опасаются за сохранность своих персональных данных» [10]. Новостные сообщения о взломах и утечках усиливают тревожность, и готовность делиться сведениями проседает скачкообразно. Уровень доверия к компаниям колеблется и это отражается на поведении клиентов. При этом бизнес сталкивается с другой линией сложности, и она касается прозрачности корпоративных решений. Пользователи сомневаются в том, как предприятия распоряжаются собранными сведениями. Опасения связаны с возможной передачей информации третьим лицам без согласия или использованием ее для рекламы. Неполные объяснения компаний усиливают ощущение разрыва между клиентом и организацией.

Значимость ПД для предприятий отрасли при перечисленных ограничениях не снижается. Компании вынуждены формулировать цель сбора сведений более ясно, иначе описание процедур воспринимается фрагментарно. Обозначение намерений по использованию информации требуется озвучивать заранее, иначе политика обработки остается непонятной. Степень прозрачности различается от компании к компании, а это создает нестабильность в понимании пользовательских рисков.

Технические ограничения нередко формируют негативное впечатление при передаче ПД. Механизм сбора дает сбой, когда компания использует неактуальные формы регистрации. Объем запрашиваемой информации иногда выглядит чрезмерным, и клиент сталкивается с ощущением навязчивости. Ненужные поля в анкете вызывают подозрения и создают неудобство, а это отражается на

отношении пользователя к процедуре передачи сведений.

Юридическая составляющая добавляет свои сложности. Законодательства о защите данных возлагают на компанию обязанность обеспечивать не только сбор, но и защиту сведений от утечек. Множество организаций не успело адаптироваться к новым нормам, и уровень рисков возрастает. Нарушение требований приводит к штрафам, и это становится заметным фактором давления на бизнес.

Пользователи сталкиваются с иной проблемой: недостаточная осведомленность о способах защиты сведений снижает готовность делиться информацией. Понимание механизмов безопасности формируется неравномерно, и сама идея передачи ПД вызывает настороженность. Коммуникация между компанией и клиентом от этого теряет устойчивость.

**Выводы.** ПД занимают устойчивое место в коммуникационных схемах, и их использование формирует основу взаимодействия бизнеса и клиента, отрасли и производителя, научно-производственных компаний и исследователей. Сбор сведений позволяет компании устанавливать прямой контакт, корректировать обслуживание и усиливать лояльность. Линия рассуждения развивается неравномерно, однако вывод остается очевидным: работа с аудиторией становится более точной при доступе к персональной информации.

Для соблюдения правил обработки информации компания вынуждена решать несколько задач. Повышение доверия клиентов требует ясных объяснений механизмов использования сведений. Прозрачность процедур не сводится к формальному описанию, и наличие технических решений становится обязательным условием, поскольку персонализация услуг должна сочетаться с соответствием законодательству.

Достижение перечисленных целей зависит от качества политики конфиденциальности. Пользователю необходимо получать полное разъяснение целей использования сведений. Защита информации требует максимального внимания, и мера ответственности распределяется неравномерно между подразделениями предприятий химического комплекса, что дополнительно осложняет процесс,

решение которого необходимо для эффективной цифровизации процессов отрасли.

#### Список литературы

1. Савинков С.В., Аверина Ю.М., Киселев В.М. Динамика развития химического комплекса российской федерации в современных условиях как результат базовых нанотехнологических разработок. Химическая промышленность сегодня, 2024. № 2. С. 13-19.
2. Савинков С.В. Коммуникативная составляющая концепции наилучших доступных технологий. В сборнике: Реклама, PR и дизайн в бренд-коммуникациях. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. С. 70-74.
3. Савинков С.В., Киселев В.М. Конвергенция форм конкуренции в российской химической отрасли. В книге: Тренды управления экономическими системами. М.: РУСАЙНС, 2024. С. 329-337.
4. Копеева А.С., Формирование системы взаимоотношений с клиентами на рынке IT-аутсорсинга [Электронный ресурс]: магистерская диссертация: 38.04.02 // А. С. Копеева. – Красноярск: СФУ. – 2016.
5. Moller K., Halinen A. 2000. Relationship marketing theory: Its roots and direction. Journal of Marketing Management 16 (1-3): 29-54
6. Shoshana Zuboff // The Age of Surveillance Capitalism: The Fight for a Human Future at the New Frontier of Power. —2019.
7. Общий регламент по защите данных GDPR URL: <https://gdpr-info.eu/> (дата обращения: 18.12.2025).
8. Федеральный закон "О персональных данных" от 27.07.2006 N 152-ФЗ (последняя редакция) // Консультант Плюс URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_61801/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_61801/) (дата обращения: 18.12.2025).
9. Фролов И.В., Правовое регулирование дистанционной торговли товарами и услугами в Российской Федерации // магистерская диссертация: 12.00.03 / И.В. Фролов. – Москва: РГАИС. – 2018.
10. ВЦИОМ: большинство россиян опасаются за сохранность своих данных в Сети // ТАСС URL: <https://tass.ru/obschestvo/20209119> (дата обращения: 18.12.2025)

УДК

Зюзько М.А., Аверина Ю.М., Франк Е Гонзалез Гонзале, Даниэль Альфонсо Робайна

### **На пути к устойчивому управлению университетом: подход Технологического университета Гаваны (CUJAE)**

Зюзько М.А. - студент 4 курса по направлению 38.03.02 Менеджмент РХТУ им. Д.И. Менделеева  
Аверина Юлия Михайловна – к.т.н., заведующий кафедрой Логистики и Экономической Информатики;  
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Франк Е Гонзалез Гонзале – аспирант Гаванского технологического университета, CUJAE

Даниэль Альфонсо Робайна – профессор первый проректор Гаванского технологического университета, CUJAE  
Технологический университет Хосе Антонио Эчеверрии, Гавана, Куба;

*В статье рассматриваются ключевые вызовы и пробелы, препятствующие эффективной интеграции принципов устойчивого развития в деятельность университетов, особенно технологических, в контексте глобальных экологических кризисов и повестки ЦУР ООН. На основе анализа последних исследований выделены системные недостатки: фрагментарность в реализации ЦУР, поверхностное включение устойчивости в учебные программы, разрыв с локальным контекстом, а также культурные, организационные и ресурсные ограничения. Подчеркивается особая роль технологических университетов в подготовке инженеров, ответственных за экологически и социально ориентированные проекты. В качестве решения предлагается модель устойчивого университетского кампуса, объединяющая когнитивный, этический, технический и социальный компоненты, подкрепленная институциональной политикой, нормативной базой и системой мониторинга.*

*Ключевые слова: устойчивое развитие, университетский кампус, технологическое образование, управление университетами.*

### **On the way to sustainable university management: the approach of the University of Technology of Havana (CUJAE)**

Zyuzko M.A., Averina Yu.M., Frank E Gonzalez Gonzalez, Daniel Alfonso Robaina

D.I. Mendeleev Russian University of Chemistry and Technology", Russia, Moscow.

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba

*The article examines the key challenges and gaps that hinder the effective integration of the principles of sustainable development into the activities of universities, especially technological ones, in the context of global environmental crises and the UN SDG agenda. Based on the analysis of recent studies, systemic shortcomings have been identified: fragmentation in the implementation of the SDGs, superficial inclusion of sustainability in curricula, a gap with the local context, as well as cultural, organizational and resource constraints. The special role of technological universities in the training of engineers responsible for environmentally and socially oriented projects is emphasized. As a solution, a sustainable university campus model is proposed, combining cognitive, ethical, technical and social components, supported by institutional policy, regulatory framework and monitoring system..*

*Keywords: sustainable development, university campus, technological education, university management.*

В первые два десятилетия XXI века экологические проблемы стали приоритетными в условиях глобальных вызовов. Такие проблемы, как изменение климата, утрата биоразнообразия, загрязнение окружающей среды и чрезмерная эксплуатация невозобновляемых природных ресурсов, постоянно обостряются. В связи с этим кризисом возникла глобальная приверженность решению проблем с экологией, созданных обществом, – инициатива, воплощенная в Целях устойчивого развития ООН (ЦУР) в рамках Повестки дня на период до 2030 года. Современная парадигма глобального развития, детерминированная Целями устойчивого развития ООН и усиливающимся влиянием ESG-повестки (Environmental, Social, Governance), инициировала тектонический сдвиг в системе оценки эффективности и перспективности инвестиционных и инновационных проектов в вузах и на предприятиях.

В этом процессе образовательные системы играют важнейшую роль, и университеты, в

частности, могут сыграть решающую роль, выступая в качестве центров генерации знаний и развития навыков в подготовке будущих специалистов, стремящихся к улучшению окружающей среды и продвижению устойчивого развития в своей сфере влияния. Для достижения этой цели крайне важно, чтобы эти учреждения разработали стратегии, интегрирующие принципы устойчивого развития во все свои процессы, чтобы создать устойчивый университетский комплекс-кампус. Неотъемлемым условием достижения этой цели является принятие подхода, основанного на участии всех членов университетского сообщества, чего можно достичь только благодаря инициативе самого руководства университета.

Несмотря на прогресс, демонстрирующий усилия многих университетов по созданию подобных кампусов, недостатки и пробелы в достижении этой цели в широком масштабе значительны, как показали исследования, проведенные за последнее десятилетие.

Был выявлен ряд пробелов, среди которых, согласно анализу Инфанте Абреу (2025) и другим недавним исследованиям, были определены три ключевых:

- Отсутствие системной интеграции и посредничества, то есть университеты часто подходят к достижению ЦУР фрагментарно, без единой модели, объединяющей исследования, преподавание и практическую деятельность. Отсутствие стандартизированной системы мониторинга и оценки делает невозможным измерение эффективности усилий в области устойчивого развития, что подрывает прозрачность, стратегическую согласованность, увеличивает разрыв между планированием и реализацией и препятствует скоординированному и гармоничному участию всех заинтересованных сторон.

- Сообщения о поверхностном вкладе в достижение ЦУР, например, отдельные проекты, не оказывающие реального влияния, а из-за фрагментарности дают иллюзию улучшений. Наблюдается поверхностный подход к включению принципов устойчивого развития в учебные программы, часто ограничивающийся отдельными курсами, не оказывающими реального влияния. Это объясняется отсутствием четкой институциональной политики, сопротивлением изменениям в традиционных академических кругах и недостаточной подготовкой преподавателей в области педагогических инструментов для интеграции принципов устойчивого развития в междисциплинарном и сквозном контексте.

- Отрыв от локального и социального контекста.

Данные показывают, что из 50 латиноамериканских университетов 70% не включают местные сообщества в свои проекты, что ограничивает оценку их реального воздействия. Это отражает разрыв между созданием знаний и их эффективным применением для социального благополучия, препятствуя переносу университетских предложений в местные реалии.

Кроме того, авторы выявляют два других пробела, связанных с культурой и организацией, а также с контекстом и ресурсами. Принцип устойчивого развития не получил широкого распространения внутри университетов во всех сферах университетской жизни, что влияет на подготовку инициативных специалистов, способных реализовывать проекты в соответствии с целями устойчивого развития. Более того, неравномерность финансирования, дефицит финансирования и ограничения институционального характера препятствуют внедрению концепции устойчивого университетского кампуса, даже в условиях развитой нормативно-правовой базы в стране

В заключение можно сказать, что пробелы в управлении университетами в целях устойчивого развития многогранны и взаимосвязаны, охватывая все аспекты — от учебных программ и культуры до

решения этой проблемы необходим стратегический, всеобъемлющий и системный подход.

Эти пробелы не являются уникальными для разных типов университетов и, следовательно, могут быть присущи любому университетскому сообществу. В число функций высших учебных заведений входит целенаправленная подготовка студентов в парадигме из профессиональной этики. Хотя студент считается центром и целью учебного процесса, крайне важно поддерживать образование, которое способствует развитию критического мышления и научно-технической ответственности, признавая студентов быть активными членами общества и ответственными за экосистему, с которой они взаимодействуют.

### **Технологический университет как ключевой игрок.**

Технологические университеты готовят специалистов, ответственных за планирование, создание и реализацию проектов, особенно в области химической технологии, оказывающих непосредственное влияние на общество, а образование в этих университетах обеспечивает им знания и навыки, необходимые не только для реализации данных проектов, но и формирует ответственное отношение к окружающей среде и системное мышление. Поэтому крайне важно, чтобы их руководство интегрировало принципы устойчивого развития в качестве основополагающего принципа в комплексную подготовку инженеров. Это подразумевает:

- Развивать экологическую идентичность, способствующую гармонии с окружающей средой.

- Продвигать профессиональную этику, связывающую техническую работу с социальной и экологической ответственностью.

- Интегрировать процесс обучения и преподавания со стратегиями устойчивого управления университетом для содействия экологически ответственному поведению и активному участию.

Для достижения цели подготовки специалистов, заканчивающих технологические университеты, их пребывание в учебном заведении должно основываться на принципах устойчивого развития университетского кампуса и осуществляться в соответствии с ними, что возможно только при условии устойчивого управления университетом.

Для эффективного управления устойчивым университетом необходима реализация концепции устойчивого университетского кампуса с комплексным подходом, объединяющим следующие компоненты:

- Когнитивный компонент: интеграция принципов устойчивого развития во весь процесс обучения.

- Компонент профессиональной этики: формирование экологически ответственного поведения посредством повышения осведомленности и участия.

- Технический аспект: адаптация объектов управления к критериям эффективности и устойчивого развития.
- Внешняя деятельность: установление связей с местными сообществами и партнерскими организациями для расширения социального воздействия.

Эти действия должны подкрепляться четкой институциональной политикой, надежной нормативно-правовой базой, непрерывным повышением квалификации преподавателей и системой оценки с точными показателями. С этой целью предлагаются следующие измерения и соответствующие им переменные (Рис. 1).

Управление	Преподавание	Университетское расширение	Исследования	Интернационализация
1. Экологически эффективная инфраструктура.  2. Удовлетворение потребностей местного сообщества.  3. Разработка политики, учитывающей принципы устойчивого развития.	1. Интеграция принципов устойчивого развития в учебную программу. 2. Подготовка и повышение квалификации преподавателей. 3. Оценка и постоянное совершенствование преподавания принципов устойчивого развития. 4. Оценка результатов обучения в области устойчивого развития. 5. Коммуникация и распространение информации.	1. Действия по созданию и поддержанию устойчивого развития кампуса. 2. Действия по включению в повестку устойчивого развития. 3. Интеграция сообщества в деятельность кампуса.	1. Прикладные исследования в области устойчивого развития и экологии. 2. Исследовательские проекты, ориентированные на устойчивое развитие. 3. Взаимодействие с сообществом в целях инклюзивности и равенства. 4. Образовательные инновации и инновации в области устойчивого развития.	1. Устойчивая международная академическая мобильность. 2. Международные совместные исследования. 3. Интернационализация на основе устойчивого развития кампуса. 4. Инновации и трансфер технологий для устойчивого развития.

Заключение:

Пробелы в устойчивом управлении университетами многогранны и взаимосвязаны, требуя системного и стратегического подхода. Для технологических университетов интеграция принципов устойчивого развития в управление — это не просто вариант, развития, а основополагающая и этическая необходимость. Только благодаря ответственному и основанному на всеобщем участии в управлении университетами подходу станет возможным подготовить специалистов, способных реагировать на социально-экологические вызовы XXI века.

### Библиографические ссылки

1. О Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. ЭКЛАК. Организация Объединенных Наций. <https://www.cepal.org/es/temas/agenda-2030-desarrollo-sostenible/acerca-la-agenda-2030>
2. Бето, Фрей. За критическое и основанное на участии образование. 2023. Гавана, Куба: Издательство «Пуэбло и образование».
3. Блог и новости об инженерии / Structuralia. Инженерные проекты и их влияние на изменение климата. (Октябрь 2022 г.). DOI: <https://www.blog.structuralia.com>.
4. Блевитт, Дж. (2018). Понимание устойчивого развития (3-е издание). Routledge.
5. Карраско В.; Лопес Й.; Мори Р.; Альваро Дж. и Моралес А. Проблемы комплексной подготовки в инженерных вузах. 2023. Университет, наука и технологии. Онлайн-версия ISSN 2542-3401 DOI:

[https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S131648212023000100099&lng=es&nrm=is](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S131648212023000100099&lng=es&nrm=is)

6. Каррильо, Г. Обзор принципов промышленной экологии. *Argumentos*, том 22, № 59, январь-апрель 2009 г., стр. 247-265. Автономный столичный университет Хочимилько. Мехико, Мексика. ISSN: 0187-5795.
7. Картер, Р.Л., и Симмонс, Б. (2010). История и философия экологического образования. В А. Bodzin, В. Shiner Kein, & S. Weaver (Eds.), Включение экологического образования в подготовку учителей естественных наук (стр. 3-16). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-92229\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-92229_1)
8. Кастро Мбвини, DN (2022). Управление университетом: вклад с точки зрения Эквадора. *Ревиста Университета и Сосьедада*, 14 (2), 547–553.
9. Куэ-Седеньо, Д., Йочик-Хунг, Г., и Васкес-Мохена, Л. (2020). Система управления университетом и постоянное совершенствование в Университете Гранмы. «Образование и общество», 18(2), 31–45.
10. CUJAE. Профиль инженера-механика. (2023). <https://www.cujae.edu.cu>
11. Эллиот, С. Р. (2005). Устойчивое развитие: экономическая перспектива. *Ресурсы, сохранение и переработка*, 44(3), 263-277. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.01.004>
12. Инфанте, М. (2025). Диагностика реализации Целей устойчивого развития в университетах: теоретический обзор. *Международная научная конференция Uciencia /25*.
13. Повестка дня в области устойчивого развития. (2023). Организация Объединенных Наций. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

УДК 658

Лавданский А.М., Аверина Ю.М.

**Роль социо-управленческих факторов при выстраивании взаимодействия промышленных компаний и университетских наук**

Лавданский Анатолий Максимович – аспирант; t.lavd@ya.ru

Аверина Юлия Михайловна – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Статья исследует критически важную, но слабо изученную роль социо-управленческих факторов в создании эффективных партнерств между ювелирными компаниями и НИИ в России. В условиях глобальной конкуренции и санкционного давления отечественная ювелирная отрасль остро нуждается в инновациях — от создания новых сплавов из драгоценных металлов до внедрения аддитивных технологий и ИИ. Предполагается, что успех таких проектов определяется не столько финансированием, сколько способностью преодолеть системный разрыв между креативно-ремесленной логикой производства, коммерческой концепцией бренда и исследовательской составляющей. На основе анализа международного опыта и отраслевой специфики предлагается трехуровневая модель взаимодействия, ключевыми элементами которой являются: формирование «командного интеллекта», внедрение «совместного лидерства» и создание среды «социально-психологического климата».

Ключевые слова: трехуровневая модель взаимодействия, модели управления, ювелирное производство, социально-психологический климат, командный интеллект, совместное лидерство

**The role of socio-managerial factors in establishing interaction between industrial companies and university sciences**Lavdanskiy A.M.<sup>1</sup>, Averina U.M.<sup>1</sup><sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article critically examines the crucial but under-researched role of socio-managerial factors in creating effective partnerships between jewelry companies and research institutes in Russia. In the context of global competition and sanctions pressure, the domestic jewelry industry is in acute need of innovation — from the development of new precious metal alloys to the introduction of additive technologies and AI. It is suggested that the success of such projects depends not so much on funding as on the ability to bridge the systemic gap between the creative-craft logic of production, the commercial brand concept, and the research component. Based on the analysis of international experience and industry specifics, a three-level interaction model is proposed, whose key elements are: the formation of "team intelligence," the implementation of "collaborative leadership," and the creation of a "socio-psychological climate" environment.*

*Keywords: three-level interaction model, management models, jewelry manufacturing, socio-psychological climate, team intelligence, collaborative leadership*

**Введение**

В современном мире эффективность промышленных организаций во многом определяется качеством взаимодействия внутри команд и степенью инновационности ювелирного производства. В условиях постоянных изменений и высокой конкуренции управление организационной системой требует учета не только формальных структур и процессов, но и внедрения социо-управленческих факторов, влияющих на мотивацию, коммуникацию и коллективное принятие решений (рис.1.).



Рис. 1 - Схема практической реализации социо-управленческих факторов в ювелирной промышленности

Стратегическая задача технологического развития и импортозамещения в российском производственном комплексе делает необходимость тесной кооперации промышленности и науки. Однако успех этого взаимодействия определяется не столько наличием финансирования или инфраструктуры, сколько эффективностью управления совместными проектами. Анализ современных теоретических подходов и эмпирических исследований позволяет выявить ключевые механизмы взаимодействия производственного сектора и научного сообщества, а также определить направления повышения их эффективности через развитие управленческих стратегий, ориентированных на укрепление социально-психологического климата.

**Модели эффективности команд и организационных систем**

Модели эффективности команд включают различные подходы, основанные на взаимодействии структурных, процессуальных и личностных аспектов. Например, модель командной эффективности Тукмана [1] выделяет стадии формирования, шторминга, нормализации и выполнения, что позволяет

оценивать динамику развития команды (рис. 2.).

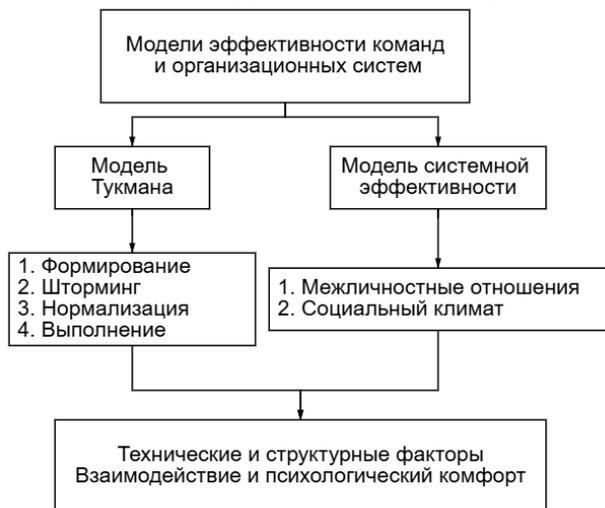


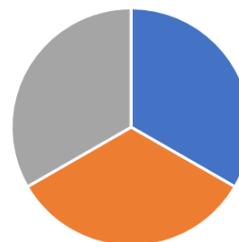
Рис. 2 – Система моделей эффективности команд и организационных систем

В рамках организационных систем широко используются модели, подчеркивающие важность межличностных отношений и социального климата, такие как модель системной эффективности [2]. Эти модели подчеркивают, что успех организации зависит не только от технических и структурных факторов, но и от уровня взаимодействия и психологического комфорта внутри команд [3]. Российское бизнес-сообщество уделяет этому явлению недостаточное внимание, в связи с чем испытывает ряд организационных проблем, которые зачастую довольно сложно оперативно устранить. Этот пробел проектного управления актуализирует необходимость исследования и формулирования теоретических данных для развития и роста отечественной промышленности.

#### **Взаимосвязь между социально-психологическим климатом и результативностью**

Исследования подтверждают, что социально-психологический климат является одним из ключевых факторов, определяющим уровень результативности команд и организаций [4]. Формирование положительного социо-психологического климата приводит к высокому уровню доверия, открытой коммуникации и поддержке внутри коллектива (рис.3.), что в свою очередь способствует повышению мотивации, снижению конфликтов и улучшению качества выполнения задач [5]. В то же время, негативный климат, характеризующийся недоверием и конфликтами, ведет к снижению производительности. Для обеспечения эффективности команды в проектной деятельности необходимо установить сбалансированную систему ролей персонала, обеспечить управление командой

проекта в определенные временные рамки, оптимальные для выполнения проекта, и акцентировать внимание на развитии активного лидерства и гибкой структуре команды проекта.



■ Высокое доверие  
■ Взаимная поддержка  
■ Открытая коммуникация

Рис.3 – Диаграмма состава положительного социо-психологического климата

#### **Заключение**

Таким образом, выстраивание эффективного взаимодействия между промышленными компаниями и университетами в производственной отрасли требует смещения управленческой парадигмы. Необходимо перейти от администрирования формальных процедур к тонкому управлению человеческими и социальными капиталами. Стратегическое внедрение моделей совместного лидерства, целенаправленное культивирование командного интеллекта и управление социально-психологическим климатом становятся критически важными компетенциями для современных менеджеров и руководителей, отвечающих за интеграцию инноваций на производство. Дальнейшая разработка практических инструментов и методик для развития этих социо-управленческих факторов позволит создать устойчивую экосистему для генерации и внедрения прорывных технологий в российском промышленном комплексе.

#### **Список литературы**

1. Tuckman, B. W. (1965). Developmental Sequence in Small Groups. *Psychological Bulletin*, 63(6), 384-399.
2. Senge, P. M. (1990). *The Fifth Discipline: The Art & Practice of The Learning Organization*. Doubleday.
3. Hackman, J. R. (2002). *Leading Teams: Setting the Stage for Great Performances*. Harvard Business Review Press.
4. George, J. M., & Brief, A. P. (1992). Feeling good and doing good: A conceptual analysis of the mood at work-organizational citizenship relationship. *Research in Organizational Behavior*, 14, 1-37.
5. Dirks, K. T., & Ferrin, D. L. (2001). The Role of Trust in Organizational Settings. *Organization Science*, 12(4), 450-467.

УДК 519.876.5

Комротов И.С., Челноков В.В., Аверина Ю.М., Ли Сяовень

## Интеллектуальная система прогнозирования качества нефти: интеграция данных синтетических маркеров и машинного обучения

Комротов Иван Сергеевич – аспирант кафедры Логистики и Экономической Информатики;

[komxim@yandex.ru](mailto:komxim@yandex.ru)

Челноков Виталий Вячеславович – д.т.н., профессор кафедры Логистики и Экономической Информатики;

Аверина Юлия Михайловна – к.т.н., заведующий кафедрой Логистики и Экономической Информатики;

Ли Сяовень – магистрант кафедры Логистики и Экономической Информатики;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева».

*В статье рассмотрена инновационная концепция интегрированной интеллектуальной системы, в которой данные хромато-масс-спектрометрического анализа маркеров становятся ключевым входом для алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ), прогнозирующих ключевые показатели качества (КПК) нефти и нефтепродуктов. В статье описан механизм сквозного процесса прогнозирования: от автоматизированного сбора проб в логистической цепи до визуализации прогнозов в интерфейсе конечного пользователя. Особое внимание уделено тому, как методы ИИ могут существенно улучшить прогнозирование, выявляя сложные нелинейные зависимости между концентрационными профилями маркеров и эксплуатационными свойствами сырья. Представленная концепция открывает путь к переходу от реактивного контроля качества к управлению на основе прогнозирования, позволяя оптимизировать логистику, минимизировать риски и повышать экономическую эффективность на всех этапах нефтяного цикла.*

*Ключевые слова:* маркеры нефти, нефть, искусственный интеллект, прогнозирование качества.

### Intelligent oil quality forecasting system: integration of synthetic marker data and machine learning

Komrotov I.S.<sup>1</sup>, Chelnokov V.V.<sup>1</sup>, Averina Yu.M.<sup>1</sup>, Li Xiaowen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

*The article discusses an innovative concept of an integrated intelligent system in which chromatography-mass spectrometric marker analysis data becomes a key input for artificial intelligence (AI) algorithms that predict key quality indicators (KPIs) of oil and petroleum products. The article describes the mechanism of the end-to-end forecasting process: from automated sample collection in the logistics chain to visualization of forecasts in the end-user interface. Special attention is paid to how AI methods can significantly improve forecasting by revealing complex nonlinear relationships between the concentration profiles of markers and the operational properties of raw materials. The presented concept paves the way for the transition from reactive quality control to forecasting-based management, allowing to optimize logistics, minimize risks and increase economic efficiency at all stages of the oil cycle.*

*Keywords:* oil markers, oil, artificial intelligence, quality forecasting.

#### Введение

Нефтегазовая отрасль функционирует в условиях высокой сложности сырьевых потоков, требований к прозрачности происхождения продукции и жестких стандартов качества конечных нефтепродуктов. С одной стороны, для решения задач прослеживаемости, защиты от хищений и расследования разливов активно внедряются системы химического маркирования. Эти системы используют уникальные синтетические маркеры, детектируемые методами высокочувствительной аналитической химии, такие как хромато-масс-спектрометрия (ВЭЖХ-МС/ГХ-МС), что позволяет однозначно опознать партию нефти на любом этапе ее пути от скважины до нефтеперерабатывающего завода (НПЗ).

С другой стороны, традиционный контроль качества нефтяного сырья и продуктов на НПЗ опирается на периодический отбор проб и их длительный лабораторный анализ по множеству стандартизированных методик для определения таких критически важных параметров, как плотность, содержание серы, фракционный состав, вязкость и кислотное число. Разрыв во времени между отбором пробы, получением результатов и принятием

технологических решений создает слепые зоны, приводящие к экономическим потерям, выпуску некачественной продукции и неоптимальному использованию мощностей.

В настоящее время системы маркирования и системы контроля качества существуют и развиваются изолированно. Однако количественный профиль синтетических маркеров несет в себе не только информацию о происхождении, но и сигналы о физико-химических свойствах нефтяной матрицы. На этот профиль влияют исходный состав сырья, процессы смешения различных партий в трубопроводах и резервуарах, а также воздействия окружающей среды (например, начало процессов биодegradации при длительном хранении). Таким образом, данные, получаемые в ходе отслеживания, потенциально содержат ценнейшую информацию для аналитики качества нефти. [1-4]

#### 1. Концепция интегрированной системы: от отслеживания к прогнозу качества

Ключевая идея предлагаемого подхода заключается в трансформации пассивной системы маркирования в активный интеллектуальный контур управления. Вместо того чтобы рассматривать анализ

маркеров лишь как конечную точку для идентификации, предлагается внедрение его результатов в динамическую модель прогнозирования свойств нефти. Это позволяет перейти от констатации факта («это партия X») к прогнозу ее технологической ценности («партия X будет иметь ожидаемую вязкость Y и содержание серы Z, что требует корректировки режима переработки»).

### 1.1. Логистическая цепочка как источник прогностических данных

Способность системы прогнозировать напрямую зависит от количества и репрезентативности данных, собираемых вдоль логистической цепочки – от скважин до сырьевых резервуаров нефтеперерабатывающего завода. Каждая точка отбора пробы превращается в сенсор, фиксирующий состояние потока. Стратегически важными являются следующие точки контроля:

- 1) Устье скважины или установка подготовки нефти для получения эталонного профиля;
- 2) Входы и выходы магистральных трубопроводов для мониторинга смешения;
- 3) Приемные пункты и товарные парки перед отгрузкой
- 4) Сырьевые резервуары НПЗ для финальной оценки перед запуском в переработку.

На каждом этапе критически важна фиксация не только концентраций маркеров, но и метаданных: точного времени, геолокации, идентификатора партии и базовых операционных параметров. Эта пространственно-временная привязка превращает разрозненные химические анализы в последовательную траекторию, отражающую историю изменения сырья под влиянием транспортировки, хранения и возможных внешних воздействий.

### 1.2. Архитектура интеллектуального прогностического контура

Искусственный интеллект выступает в роли когнитивного ядра системы. На этапе обучения модель машинного обучения настраивается на исторических данных, где для одних и тех же партий известна пара: входной вектор (профиль концентраций маркеров на входе в цепочку или на приемке) и целевой вектор (фактические показатели качества, измеренные позднее стандартными методами после переработки или испытаний). Алгоритм в процессе обучения выявляет скрытые, зачастую нелинейные, зависимости между этими наборами данных.

В эксплуатационном режиме система работает в реальном времени. Получив результаты ВЭЖХ-МС для новой партии, ИИ-модель вычисляет прогноз ее ключевых свойств, таких как плотность, содержание серы, фракционный состав и вязкость. Таким образом, создается цифровой двойник партии сырья, чьи прогнозируемые атрибуты становятся известны на дни или недели раньше результатов физических лабораторных испытаний. Это опережающее знание формирует основу для управления, позволяя

планировать оптимальные схемы смешения партий, заранее корректировать технологические режимы установок и минимизировать риски переработки некондиционного сырья. [5-8]

## 2. Методы искусственного интеллекта для решения задачи прогнозирования

Для реализации концепции интеллектуального прогнозирования качества на основе отслеживаемых данных требуется применение специализированных алгоритмов машинного обучения, способных работать с особенностями поставленной задачи. Ключевыми особенностями являются: относительно небольшой объем выборки (десятки-сотни партий в год), высокий уровень шума в аналитических данных, необходимость обработки табличных данных смешанного типа и, что самое важное, наличие сложных нелинейных и многомерных зависимостей между признаками.

### 2.1. Категории решаемых задач и постановка проблемы

В контексте системы прогнозирования на первый план выходит задача многомерной регрессии, где требуется по вектору входных признаков X (концентрации маркеров  $M_1 \dots M_n$ , метаданные) предсказать вектор непрерывных целевых переменных Y (плотность, содержание серы и т.д.). Параллельно может решаться задача бинарной или многоклассовой классификации для оперативной сортировки сырья, например, отнесение партии к категориям норма или требует дополнительного контроля. Третьей важной задачей является обнаружение аномалий, направленное на выявление нештатных ситуаций, таких как грубое загрязнение или фальсификация, которые приводят к резкому искажению профиля маркеров, не укладывающемуся в изученные закономерности.

### 2.2. Анализ применимых алгоритмов машинного обучения

Выбор конкретного алгоритма определяется компромиссом между точностью, интерпретируемостью, скоростью обучения и устойчивостью к переобучению на малых выборках.

1) Метод опорных векторов для регрессии: Эффективен в условиях высокой размерности признакового пространства. Его преимущество – способность моделировать нелинейные зависимости через применение различных ядер. Однако данный метод требует тщательной настройки гиперпараметров и может быть критичным к масштабированию данных, что актуально при работе с концентрациями маркеров, различающимися на порядки.

2) Ансамблевые методы на основе деревьев решений: Данные методы являются одними из наиболее перспективных для данной предметной области.

3) Случайный лес (Random Forest): строит множество декоррелированных деревьев решений, что значительно повышает устойчивость модели к переобучению по сравнению с одним деревом. Важнейшее практическое преимущество –

встроенный механизм оценки важности признаков, который позволяет количественно определить, концентрации каких именно маркеров наиболее существенно влияют на прогноз каждого свойства. Это напрямую отвечает на вопрос интерпретируемости модели.

4) Градиентный бустинг: Эти алгоритмы последовательно строят ансамбль деревьев, где каждое новое дерево корректирует ошибки предыдущих. Они часто демонстрируют наивысшую точность прогноза на структурированных данных. Такой метод эффективно работает с категориальными признаками (например, код месторождения), что позволяет естественным образом включать в модель метаданные.

5) Искусственные нейронные сети (ИНС): Полносвязные нейронные сети представляют собой универсальные аппроксиматоры, способные выявлять сколь угодно сложные нелинейные зависимости. Для успешного применения в условиях ограниченных данных требуется использование техник регуляризации и архитектурных решений, предотвращающих переобучение. Нейронные сети могут быть особенно полезны, если в качестве входных данных рассматриваются не только итоговые концентрации, но и raw-данные – фрагменты хроматограмм или спектров, однако это требует на порядки большего объема обучающей выборки.

### 2.3. Подходы к интерпретации моделей

Доверие к системе со стороны технологов и лаборантов невозможно без понимания логики ее выводов. Поэтому использование методов объяснимого искусственного интеллекта является не опциональным, а обязательным элементом системы.

Встроенная важность признаков ансамблевых методов дает общее представление о значимости маркеров.

Метод SHAP (Shapley Additive exPlanations) идет дальше, позволяя объяснить прогноз для каждой отдельной партии. SHAP рассчитывает вклад каждого маркера в итоговое предсказанное значение, показывая, какие из них «подтолкнули» прогноз в сторону увеличения, а какие – уменьшения показателя качества. Это позволяет не только валидировать модель, но и выдвигать гипотезы о физико-химических причинах выявленных зависимостей (например, маркер М4 всегда ассоциирован с ростом вязкости, что может указывать на его связь с высокомолекулярными компонентами нефти). [9-13]

### 3. Архитектура процесса прогнозирования: от пробы к управляющему решению

Реализация описанной концепции требует четко структурированного сквозного процесса, который обеспечивает преобразование физической пробы нефти в цифровой прогноз и, в конечном итоге, в осмысленное действие. Этот процесс можно разделить на пять последовательных, технологически связанных этапов.

### 3.1. Сбор и оцифровка данных

Начальным и критически важным звеном является автоматизированный или стандартизированный отбор проб в заранее определенных точках логистической цепи. Полученная проба направляется в аналитическую лабораторию, оснащенную системой ВЭЖХ-МС, где проводится количественный анализ целевых синтетических маркеров. Результатом этого этапа является не просто бумажный протокол, а структурированный цифровой объект – «пакет данных пробы». Этот пакет включает:

1) вектор количественных признаков (концентрации маркеров М1-Мn в ppm)

2) метаданные (уникальный ID пробы, дата-время отбора, геолокация, идентификатор партии/резервуара, возможные операционные комментарии)

3) контрольные параметры качества самого анализа (сигнал-шум, соответствие калибровке). Автоматическая генерация такого цифрового пакета минимизирует человеческий фактор и обеспечивает согласованность входных данных для модели.

### 3.2. Передача и агрегация данных

Цифровые пакеты данных из различных точек отбора и аналитических лабораторий передаются в единое централизованное хранилище – платформу данных. На этом этапе происходит критически важная операция, данные о пробе связываются с другой доступной информацией.

### 3.3. Предобработка и формирование признакового пространства

Перед подачей в модель машинного обучения агрегированные данные проходят этап предобработки. Он включает: проверку на целостность и отсутствие технических выбросов; заполнение пропущенных значений (если применимо) консервативными методами; нормализацию или стандартизацию числовых признаков для приведения их к сопоставимому масштабу.

### 3.4. Исполнение прогностической модели и генерация результата

Подготовленный вектор признаков передается на вход обученной модели машинного обучения. Модель выполняет вычисления и выдает результат в формате, удобном для интерпретации.

### 3.5. Визуализация, интеграция и замыкание контура управления

Итоговый прогноз не является конечной точкой. Он должен быть эффективно донесен до лиц, принимающих решения. Для этого данные визуализируются в специализированных программах, где технолог видит не просто цифры, а тренды, сравнение с нормативными пределами и гистограммы вклада признаков.

Таким образом, контур замыкается: данные о маркерах, преобразованные ИИ в прогноз, становятся основой для корректировки реального физического процесса переработки, максимизируя выход целевых продуктов и минимизируя риск получения брака. [14-16]

#### 4. Преимущества, ограничения и практические аспекты внедрения

Реализация предложенной интегрированной системы прогнозирования сопряжена с рядом фундаментальных преимуществ, способных трансформировать операционную деятельность, однако ее практическое внедрение требует осознания и преодоления существенных вызовов технического и организационного характера.

##### 4.1. Ключевые преимущества интегрированного подхода

Главное конкурентное преимущество системы заключается в сокращении временного цикла контроля качества на порядки. Получение прогноза ключевых свойств в течение нескольких часов после отбора пробы против нескольких дней или недель при традиционном лабораторном цикле кардинально меняет парадигму управления.

##### 4.2. Технические и организационные вызовы

Внедрение системы упирается в несколько критических барьеров:

- Для обучения первоначальной работоспособной модели необходим значительный исторический массив парных данных: профили маркеров и соответствующие им результаты полного лабораторного анализа. Формирование такой базы данных требует времени и согласованных действий на этапе пилотной эксплуатации.
- Необходимость стандартизации и автоматизации аналитического контура: Воспроизводимость и сопоставимость данных ВЭЖХ-МС из разных лабораторий или в разное время – фундаментальное требование.
- Сложность интеграции в существующую ИТ-инфраструктуру: Система должна быть технически и организационно встроена между существующими платформами предприятия.
- Психологический барьер: Технологи и лаборанты могут скептически относиться к прогнозам алгоритма, особенно если они противоречат опыту или первым визуальным оценкам.

##### 4.3. Ограничения метода и пути их минимизации

Подход имеет естественные границы применимости:

1. Ограничение областью экстраполяции модели: Модель надежна только в пределах диапазона данных, на которых она обучалась. Работа с принципиально новым типом сырья (например, с нового месторождения с иным геохимическим типом нефти) потребует дообучения модели на новых парных данных.
2. Зависимость от стабильности маркерной системы: Метод предполагает химическую и аналитическую стабильность самих маркеров в процессе транспортировки и хранения. Непредвиденные химические реакции или сорбция маркеров могут исказить профиль, что будет интерпретировано как изменение свойств нефти.
3. Неспособность прогнозировать абсолютно все параметры: Некоторые специфические показатели

качества, слабо коррелирующие с общей химической картиной, фиксируемой маркерами, могут оставаться за пределами возможностей прогноза.

Для минимизации этих ограничений необходима стратегия постоянного мониторинга и развития системы. Это включает: регулярную рекалибровку и валидацию модели на новых данных; создание подсистемы детектирования аномалий в самих аналитических данных (для отсева технически некорректных проб); разработку модуля активного обучения, который будет указывать на типы сырья, по которым необходима дополнительная информация для улучшения прогноза. Таким образом, система должна рассматриваться не как статический продукт, а как динамически развивающийся цифровой актив, чья точность и надежность со временем возрастают.[16-20]

#### 5. Заключение и перспективы

Интеграция систем химического отслеживания с методами искусственного интеллекта открывает принципиально новые возможности для управления качеством в нефтегазовой отрасли. Предложенная концепция трансформирует пассивную функцию маркеров – идентификацию – в активный инструмент аналитики. Практическая ценность заключается в создании архитектуры сквозного интеллектуального контура, способного сократить цикл контроля качества с дней до часов и обеспечить переход к активной оптимизации логистических и технологических процессов.

Перспективы развития данного направления лежат в нескольких взаимосвязанных плоскостях:

1. Развитие гибридных и адаптивных моделей. Наиболее многообещающим направлением является создание гибридных моделей, сочетающих данные о маркерах с другой оперативной информацией: показаниями потоковых анализаторов, технологическими параметрами установок предварительной подготовки, данными геолого-геофизических исследований скважин. Объединение этих разнородных данных с помощью методов многомодального машинного обучения позволит существенно повысить точность и надежность прогнозов.
2. Создание цифровых двойников партий сырья. Логическим продолжением является разработка полноценных цифровых двойников для каждой партии нефти. Такой двойник будет аккумулировать всю историю данных: от геологического происхождения и профиля маркеров на выходе с месторождения через все этапы логистики с прогнозируемыми корректировками свойств до рекомендуемых оптимальных параметров переработки.
3. Внедрение на границе сети (Edge Computing). Для оперативного реагирования в критически важных точках перспективно использование edge-вычислений. Облегченные версии моделей, развернутые непосредственно рядом с аналитическими приборами, смогут выдавать предварительные прогнозы и сигналы тревоги в

режиме реального времени, даже в условиях ограниченного канала связи с центральной платформой.

4. Экономико-управленческие и нормативные аспекты. Дальнейшие исследования должны быть направлены на количественную оценку экономического эффекта от внедрения таких систем и разработку методик обоснования инвестиций. Параллельно требуется проработка нормативной базы, регламентирующей использование прогнозов на основе ИИ для целей таможенного декларирования, сертификации продукции или расследования инцидентов.

Синтез технологий химического маркирования и искусственного интеллекта позволит сделать переход нефтегазовой отрасли к управлению сырьевыми потоками основанному на оперативно получаемых данных.

#### Список литературы

1) Бакаев А., Коптев Д. Маркировка нефти и нефтепродуктов // Энергетическая политика. – 2021. – №. 6 (160). – С. 92-107.

2) Жагфаров Ф. Г. и др. Биомаркеры нефти: основные типы, значение и области применения // химия твердого топлива. – 2024. – №. 3. – С. 67-81.

3) Нечитайлов А. А. Материалы и методы маркировки нефтепродуктов (Обзор) // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 5. – С. 687-698.

4) Нижник А. Е. и др. Контроль качества экспортируемой нефти на системах СИКН // Наука. Новое поколение. Успех. – 2022. – С. 219-222.

5) Лободин М. А., Масленникова В. А., Гузик Т. В. Метрологическое обеспечение методов контроля качества нефти и нефтепродуктов // Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов. – 2022. – С. 223-228.

6) Мигел А. А., Осипов В. И. Проблема маркировки нефтепродуктов как способ исключения фальсификаций // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2022. – №. 5-2. – С. 174-176.

7) Дорохин Р. А., Крещенок Р. И. Обзор перспективных методов транспортировки высоковязких нефтей // трибуна молодых учёных. – 2023. – С. 82-84.

8) Мокшанов Д. А. Оптимизация процессов метрологического обеспечения на нефтедобывающих предприятиях: опыт российских компаний // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №. 6-2 (105). – С. 6-11.

9) Травушкина А. А. и др. Обзор перспектив развития технологии цифровых двойников

продуктов, услуг и сервисов в секторе материального производства // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12. – №. 3. – С. 1485-1502.

10) Alzahawy A., Issa H. Intelligent Petroleum Processing: A Short Review on Applying AI/ML to Petroleum Products Optimization. – 2024.

11) Lawal A. et al. Machine learning in oil and gas exploration: A review // Ieee Access. – 2024. – Т. 12. – С. 19035-19058.

12) Trinh C., Meimaroglou D., Hoppe S. Machine learning in chemical product engineering: the state of the art and a guide for newcomers // Processes. – 2021. – Т. 9. – №. 8. – С. 1456.

13) Otchere D. A. et al. Application of supervised machine learning paradigms in the prediction of petroleum reservoir properties: Comparative analysis of ANN and SVM models // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Т. 200. – С. 108182.

14) Tariq Z. et al. A systematic review of data science and machine learning applications to the oil and gas industry // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – Т. 11. – №. 12. – С. 4339-4374.

15) Gallareta J. G. et al. Advancements in Soft Sensor Technologies for Quality Control in Process Manufacturing: A Review // IEEE Sensors Journal. – 2025.

16) Sircar A. et al. Application of machine learning and artificial intelligence in oil and gas industry // Petroleum Research. – 2021. – Т. 6. – №. 4. – С. 379-391.

17) Choubey S., Karmakar G. P. Artificial intelligence techniques and their application in oil and gas industry // Artificial Intelligence Review. – 2021. – Т. 54. – №. 5. – С. 3665-3683.

18) Abdelhamid K., Ammar T. B., Laid K. Artificial intelligent in upstream oil and gas industry: A review of applications, challenges and perspectives // International Conference on Artificial Intelligence and its Applications. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – С. 262-271.

19) Abdelhamid K., Ammar T. B., Laid K. Artificial intelligent in upstream oil and gas industry: A review of applications, challenges and perspectives // International Conference on Artificial Intelligence and its Applications. – Cham : Springer International Publishing, 2021. – С. 262-271.

20) Elijah O. et al. A survey on industry 4.0 for the oil and gas industry: Upstream sector // Ieee Access. – 2021. – Т. 9. – С. 144438-144468.

**Российский химико-  
технологический  
университет  
имени Д.И. Менделеева**



Научное издание

**УСПЕХИ В ХИМИИ И ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**Том XXXIX**

**№ 13 (304)**

Компьютерная верстка: Верхососова А.И.  
Текст репродуцирован с оригиналов авторов

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Совет молодых ученых и специалистов (СМУС)

Адрес университета: 125047, г. Москва,

Миусская пл., д. 9