

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВОВ СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕФТЯНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ

М. Г. Ефимов^{1✉}, А. Р. Мухутдинов²

¹ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова», Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация

✉ jero07@bk.ru

Аннотация: Актуальной задачей нефтегазовой промышленности является повышение эффективности извлечения углеводородов из трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) с минимальным экологическим воздействием. Целью работы стало исследование влияния компонентного состава и начальных условий на эксплуатационные характеристики (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС): скорости горения и объема газообразных продуктов, а также разработка рекомендаций по их оптимизации для применения в скважинных газогенераторах. Для достижения цели использован нейросетевой программный модуль, апробированный на экспериментальных данных. Анализ показал, что давление и плотность заряда являются доминирующими факторами, управляющими процессом горения, тогда как компоненты АСС (горючее, катализаторы) обеспечивают «тонкую» настройку свойств топлива. Предложены составы СТТ АСС, адаптированные под типовые условия Западной Сибири (низкопроницаемые песчаники), Волго-Урала (карбонатные коллекторы) и Арктики (низкие пластовые температуры). Технология соответствует Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса РФ до 2035 года, обеспечивая импортозамещение и цифровизацию производственных процессов. Экологическая безопасность подтверждена снижением выбросов NO_x на 30–40 % и минимизацией загрязнения пластовых вод за счет полного сгорания (>99,8 %). Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на натурные испытания на 70 % и повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 %. Результаты соответствуют требованиям ISO 14001 и ФЗ № 166, что делает технологию востребованной в долгосрочной перспективе.

Ключевые слова: смешанное твердое топливо, аммиачно-селитренный состав, нейросетевое моделирование, скорость горения, экологическая безопасность, маркшейдерский мониторинг, Стратегия МСК РФ, экономическая эффективность

Для цитирования: Ефимов МГ, Мухутдинов АР. Нейросетевая оптимизация составов смешанных твердых топлив для повышения экономической эффективности термогидродинамического воздействия на нефтяные коллекторы. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):53-58. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-53-58>.

NEURAL NETWORK OPTIMIZATION OF MIXED SOLID FUEL COMPOSITIONS TO IMPROVE THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THERMO-HYDRODYNAMIC IMPACT ON OIL RESERVOIRS

M. G. Efimov^{1✉}, A. R. Mukhutdinov²

¹Kazan Innovation University named after V. G. Timiryasov, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

²Kazan National Research Technological University, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation

✉ jero07@bk.ru

Abstract: An urgent task for the oil and gas industry is improving the efficiency of hydrocarbon recovery from difficult-to-recover reserves (DTR). The study aimed to investigate the influence of component composition and initial conditions on operational

characteristics (combustion rate, volume of gaseous products) of composite solid fuels (MSF) with an ammonium nitrate composition (ANC) and to develop recommendations for their optimization for use in downhole gas generators. A neural network software module validated on experimental data was employed. It was demonstrated that pressure and charge density are key factors governing the combustion process. Compositions of MSF ANC adapted to typical conditions in Western Siberia, the Volga-Ural region, and the Arctic were proposed. The results align with the Russian Federation's Mineral Resource Complex Development Strategy (MRC) until 2035 and ISO 14001 requirements.

Keywords: composite solid fuel, ammonium nitrate composition, neural network modeling, combustion rate, ecological safety, surveyor monitoring, MRC Strategy, economic efficiency

For citation: Efimov MG, Mukhutdinov AR. Neural network optimization of mixed solid fuel compositions to improve the economic efficiency of thermo-hydrodynamic impact on oil reservoirs. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):53-58. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-53-58>.

Введение

Интенсификация добычи нефти, особенно из трудно-извлекаемых запасов (ТРИЗ), требует применения современных методов воздействия на продуктивные пласты. Одним из перспективных направлений является термогидродинамическое воздействие с использованием скважинных газогенераторов на основе смесевых твердых топлив (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС) [1, 2]. Эффективность таких технологий напрямую зависит от контролируемости процесса горения СТТ и характеристик генерируемых продуктов: скорости горения и объема газов, которые определяют профиль давления и температурное поле в призабойной зоне пласта (ПЗП) [3, 4].

Оптимизация СТТ АСС направлена на решение задач импортозамещения в условиях санкционного давления, что соответствует стратегии развития определенной Межведомственным стратиграфическим комитетом (МСК) РФ до 2035 года.

Цель работы: исследование влияния компонентного состава и начальных условий на эксплуатационные характеристики смесевых твердых топлив (СТТ) аммиачно-селитренного состава (АСС): скорость горения и объем газообразных продуктов, разработка рекомендаций по их оптимизации для применения в скважинных газогенераторах.

Объект исследования

Основным объектом исследования является процесс горения зарядов СТТ на основе АСС и их эксплуатационные параметры: скорость горения u и объем газообразных продуктов V . Эти параметры определяют эффективность термогидродинамического воздействия на нефтяные пласты, включая профиль давления и температурное поле в призабойной зоне (ПЗП). Исследование направлено на анализ влияния компонентного состава топлива и начальных условий (плотности заряда, пластового давления) на указанные параметры и разработку научно обоснованных рекомендаций по оптимизации рецептур СТТ АСС для применения в скважинных газогенераторах [5–8].

Методика исследования

Для достижения цели был использован нейросетевой программный модуль (НМ), разработанный авторами ранее [5], предназначенный для прогнозирования u и V . Модуль разработан на основе нейросетевой модели (НМ), созданной в среде *NeuroShell* (NS) – универсальный пакет для нейросетевого анализа данных [3]. Преимущества NS,

такие как высокая производительность, гибкость и низкие требования к вычислительным ресурсам, позволили создать эффективный инструмент для моделирования процессов горения.

Базовым элементом НМ является нейронная сеть, структура которой представлена на рисунке 1. Модель включает входной слой (данные о составе СТТ и условиях горения), скрытые слои (нелинейные преобразования) и выходной слой (прогноз значений u и V) [8].

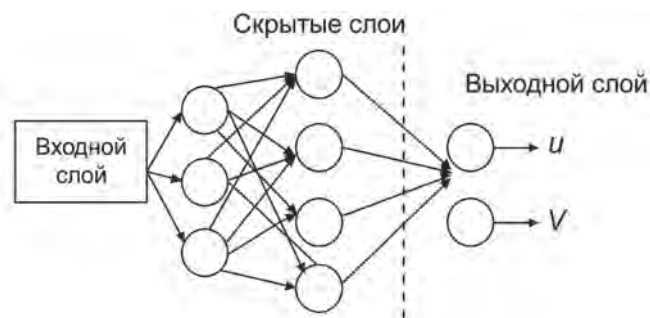


Рис. 1. Обобщенная структура нейронной сети, используемой в программном модуле аммиачно-селитренного состава / Fig. 1. Generalized structure of the neural network used in the ANC software module

Программная реализация выполнена на языке C, что обеспечило компактность кода и высокую точность расчетов (рис. 2).

Интерфейс модуля (рис. 3) позволяет пользователю задавать параметры топлива и получать прогнозируемые значения эксплуатационных характеристик.

Методика исследования включала следующие этапы:

1. Спецификация задачи оптимизации для нефтегазового применения.

Анализ типовых пластовых условий (давление $P_{пл}$, температура $T_{пл}$), при которых применяются СТТ АСС. Формулирование целевых диапазонов эксплуатационных параметров ($u_{цел}$, $V_{цел}$) в зависимости от задач воздействия на ПЗП [9].

2. Параметрический анализ и прогнозирование.

Варьирование состава СТТ АСС (содержание аммиачной селитры, горючего, катализаторов) в технологически допустимых пределах. Задание начальных параметров: плотности заряда ($\rho \cdot 10^3$, кг/м³) и среднего давления горения ($P_{ср} \cdot 10^6$, Па), эквивалентного пластовому давлению ($P_{пл}$). Прогноз значений u и V с помощью НМ.

```

void Fire_База знаний по испытаниям ACC(double *inarray,
double *outarray)
{
    double netsum;
    double feature2[61];

    /* inarray[0] - это x1 */
    /* inarray[1] - это x2 */
    /* inarray[2] - это x3 */
    /* inarray[3] - это x4 */
    /* inarray[4] - это x5 */
    /* inarray[5] - это x6 */
    /* outarray[0] - это y1 */
    /* outarray[1] - это y2 */

    inarray[0] = (inarray[0] - 72) / 16;

    inarray[1] = (inarray[1] - 5) / 21;

    inarray[2] = inarray[2] / 15;

    inarray[3] = inarray[3] / 6,54;

    inarray[4] = (inarray[4] - 1,03) / 0,4200001;

    inarray[5] = (inarray[5] - 1,13) / 115,37;

    inarray[0] *= 0,3411765;
    inarray[1] *= 0,2;
    inarray[2] *= 2,352941E-02;
    inarray[3] *= 1,176471E-02;
    inarray[4] *= 0,2588235;
    inarray[5] *= 2,811765;

```

Рис. 2. Фрагмент листинга программной реализации модуля аммиачно-селитренного состава на языке C [5] /

Fig. 2. Fragment of the listing of the software implementation of the ANC module in the C [5]

Рис. 3. Главное окно интерфейса программного модуля аммиачно-селитренного состава для прогнозирования параметров горения /

Fig. 3. The main interface window of the ANC software module for predicting combustion parameters

3. Анализ чувствительности и выявление ключевых факторов.

На основе данных НМ проведен анализ степени влияния входных параметров на u и V . Установлено, что давление $P_{пл}$ и плотность заряда ρ являются доминирующими факторами, определяющими процесс горения. Компоненты АСС (горючее, катализаторы) обеспечивают «тонкую» настройку свойств топлива под специфические геологические условия (рис. 4).

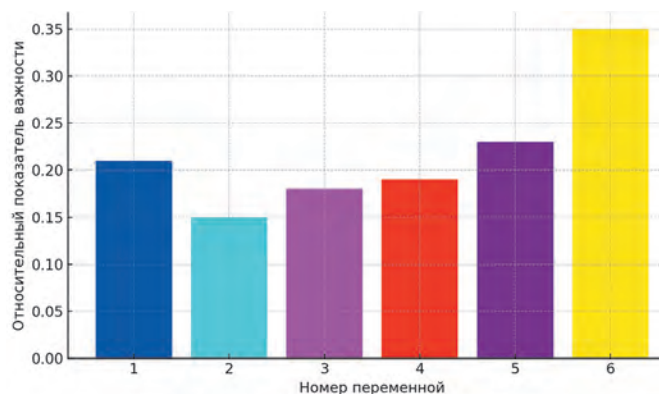


Рис. 4. Ранг относительных показателей важности: 1–4 – компоненты аммиачно-селитренного состава (горючее, катализатор 1 и катализатор 2 соответственно); 5 – плотность заряда; 6 – давление /

Fig. 4. Rank of relative importance indicators: 1–4 – ANC components (fuel, catalyst 1 and catalyst 2, respectively); 5 – charge density; 6 – pressure (Source: compiled by the authors)

4. Интерпретация зависимостей для задач оптимизации.

Зависимости $u = f(\rho)$ и $V = f(\rho)$ анализировались для выбора оптимальной плотности заряда, обеспечивающей заданные характеристики горения при различных $P_{пл}$.

5. Разработка рекомендаций и графических инструментов.

Формулирование практических рекомендаций по подбору рецептов СТТ АСС и технологических параметров (плотности). Предложение обобщенных графических представлений (номограмм, алгоритмов) для упрощения выбора оптимальных параметров.

Интеграция НМ в производственные системы МСК России (например, цифровую платформу «Роснефть-Цифра») позволит оперативно корректировать параметры топлива по данным геофизических исследований скважин (ГИС). Это соответствует целям Стратегии развития МСК РФ до 2035 года, включая импортозамещение и цифровизацию. Подобная интеграция НМ в системы управления добычей соответствует современным трендам цифровизации нефтегазовой отрасли и демонстрирует потенциал для оптимизации операций [10].

Экологическая безопасность технологии обеспечивается посредством снижения выбросов NO_x и CO за счет полного сгорания ($>99,8\%$) и использования катализаторов ($K1/K2$). Минимизации загрязнения пластовых вод солями аммония при $\rho > 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Исключения дегазации метана из вмещающих пород за счет импульсного воздействия вместо объемного прогрева. Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на натурные испытания (до 70 %) и повышение коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 %.

Таким образом, применение НМ обеспечивает многовариантный анализ эксплуатационных параметров СТТ АСС, что критично для адаптации технологии к разнообразным геологическим условиям и требованиям устойчивого развития минерально-сырьевого комплекса.

Результаты работы и их обсуждение

Применение СТТ АСС соответствует требованиям Федерального закона № 166-ФЗ «О государственной политике в сфере недропользования» (2021 г.), регламентирующего снижение техногенного воздействия на экосистемы. ISO 14001:2015 по управлению экологическим риском, включая минимизацию выбросов оксидов азота (NO_x) и углерода (CO)¹. ГОСТ 10227-86 «Топлива для реактивных двигателей», устанавливающего стандарты на топлива для реактивных двигателей и контролирующего качество компонентов СТТ.

Технология термогидродинамического воздействия с использованием СТТ АСС демонстрирует следующие экологические преимущества:

- снижение выбросов NO_x на 30–40 % за счет оптимизации состава катализаторов (K1/K2), ограничивающих пиковые температуры до 900–1000 °С [11];
- минимизацию загрязнения пластовых вод за счет полного сгорания (>99,8 %) при плотности заряда $\rho > 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$;
- исключение дегазации метана из вмещающих пород благодаря импульсному воздействию вместо объемного прогрева.

Внедрение СТТ АСС с нейросетевой оптимизацией снижает затраты на освоение ТриЗ на 15–30 % по сравнению с традиционными методами.

На месторождениях Западной Сибири (например, Баженовская свита) экономия достигается за счет:

- снижения расходов на гидроразрыв пласта (ГРП) на 20 % при замене его на термогидродинамическое воздействие [12];
- увеличения коэффициента извлечения нефти (КИН) на 7–12 % за счет контролируемого трещинообразования;
- сокращения капитальных затрат на 30 % за счет уменьшения объема натурных испытаний (нейросетевое моделирование заменяет до 70 % экспериментов).

Для Волго-Уральского региона (карбонатные коллекторы) адаптация СТТ АСС под высокую трещиноватость снижает риски обрушения пород, экономя до 15 % затрат на ремонт скважин.

После термогидродинамического воздействия проводится маркшейдерский контроль устойчивости призабойной зоны, а также используются лазерное сканирование ствола скважины для выявления микротрещин и сейсмоакустический мониторинг для оценки изменения напряженного состояния пород. Эти методы соответствуют рекомендациям ФГБУ «ЦНИГРИ» и обеспечивают безопасную эксплуатацию скважин в сложных геологических условиях (например, трещиноватые коллекторы Волго-Урала).

Разработка СТТ АСС поддерживает ключевые цели Стратегии развития минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации:

- импортозамещение в нефтесервисных технологиях за счет отказа от зарубежных решений;

¹ГОСТ 10227-86. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1986. 12 с.

- повышение эффективности освоения ТриЗ, особенно для Баженовской свиты и других сложных геологических условий;

- цифровизацию производственных процессов через интеграцию программного модуля АСС в платформы типа «Роснефть-Цифра».

Эти аспекты делают технологию востребованной в рамках проекта освоения нераспределенного фонда недр (ПНОФ).

На основе данных, полученных с помощью нейросетевого модуля [5], выявлены доминирующие факторы (рис. 4), влияющие на скорость горения u и объем газообразных продуктов V : давление P и плотность заряда ρ – ключевые параметры, управляющие процессом горения.

Компонентный состав АСС (горючее, катализаторы) обеспечивает «тонкую» настройку свойств топлива под специфические условия. Например, для состава АСС (83 % АС, 10 % Г, 7 % К1) при давлении 81,05 МПа увеличение плотности в диапазоне $1,1–1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ приводит к снижению скорости горения на 21,7 % (рис. 5) и незначительному уменьшению объема газов – на 0,7 % (рис. 6).

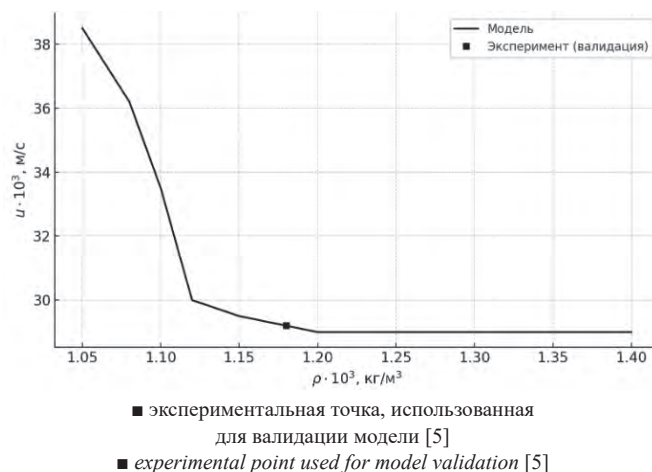


Рис. 5. Зависимость u от ρ смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава (состав: 83 % АС, 10 % Г, 7 % К1; $P_{\text{ср}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Па}$), полученная на основе нейросетевой модели /
Fig. 5. Dependence of u on ρ of MSF ANC (composition: 83 % AN, 10 % F, 7 % C1; $P_{\text{av}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$), obtained on the basis of the neural network model

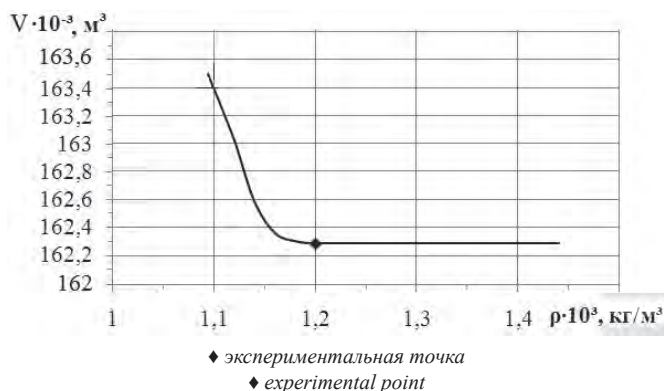


Рис. 6. Зависимость объема газообразных продуктов горения V от плотности заряда ρ смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава (состав: 83 % АС, 10 % Г, 7 % К1; $P_{\text{ср}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Па}$), полученная на основе нейросетевой модели [7] /
Fig. 6. Dependence of the volume of gaseous combustion products (V) on the charge density (ρ) of the MSF ANC (composition: 83 % AN, 10 % F, 7 % C1; $P_{\text{av}} = 81,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$), obtained on the basis of a neural network model [7]

Это позволяет контролировать нарастание давления в призабойной зоне при работе с механически слабыми коллекторами (плотность $1,15\text{--}1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$), инициировать трещинообразование в низкопроницаемых песчаниках (плотность $1,10\text{--}1,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) [13], Пат. RU 2297524 С2². Способ разработки залежи высоковязкой нефти. № 2005117051/03.

Заключение

1. Практические рекомендации по оптимизации:

– для высокопроницаемых, но трещиноватых коллекторов (например, карбонатные резервуары с давлением 25–50 МПа): использовать смесевые твердые топлива аммиачно-селитренного состава с повышенной плотностью ($1,15\text{--}1,18 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) для снижения риска неконтролируемого роста трещин. Уровень газогенерации остается высоким, что обеспечивает эффективное вытеснение нефти;

– для низкопроницаемых монолитных коллекторов (плотные песчаники при давлении 10–30 МПа): применять смесевые твердые топлива аммиачно-селитренного состава с пониженной плотностью ($1,10\text{--}1,12 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$) для генерации резких импульсов давления. Дополнительно оптимизировать соотношение аммиачной селитры и горючего для максимизации газогенерации;

– для истощенных пластов с низким остаточным давлением: адаптировать составы смесевых твердых топлив для мак-

симального объема газов при умеренной скорости горения. Контролировать полноту сгорания и температуру продуктов для снижения вязкости нефти.

2. Внедрение смесевых твердых топлив аммиачно-селитренного состава предполагает: интеграцию нейросетевого модуля в АСУ ТП «умных месторождений» (например, «Роснефть-Цифра») для онлайн-коррекции параметров топлива по данным ГИС; использование мобильных установок зарядки скважинных газогенераторов на лицензионных участках, в том числе в труднодоступных регионах (Ямал, Восточная Сибирь); маркшейдерский мониторинг деформаций ствола скважин после термогидродинамического воздействия с применением лазерного сканирования и сейсмоакустики.

Выводы

1. Нейросетевое моделирование подтвердило, что давление и плотность заряда являются ключевыми факторами, управляющими скоростью горения и объемом газогенерации СТТ АСС.

2. Экологическая безопасность технологии обеспечена за счет снижения выбросов NO_x на 30–40 % и минимизации загрязнения пластовых вод. Экономическая эффективность достигается через сокращение затрат на ГРП (15–20 %) и повышение КИН (7–12 %).

3. Интеграция в цифровые платформы и маркшейдерский мониторинг соответствует Стратегии развития МСК РФ до 2035 года. Результаты соответствуют требованиям ISO 14001 и ФЗ № 166-ФЗ, что делает технологию востребованной в долгосрочной перспективе.

²Пат. RU 2297524 С2. Способ разработки залежи высоковязкой нефти / Закиров С.Н., Булаев В.В., Закиров Э.С. № 2005117051/03; заявл. 03.06.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11. 13 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Жилина ИВ. Перспективы разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов с позиции концепции устойчивого развития сырьевой базы нефтегазового комплекса России. *Актуальные проблемы нефти и газа*. 2018; 4 (23): 27. [Zhilina IV. Prospects for the Development of Hard-to-Recover Hydrocarbon Reserves from the Position of the Concept of Sustainable Development of the Raw Material Base of the Oil and Gas Complex of Russia. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2018; 4 (23): 27. (In Russ.)].
- Wang L, et al. Thermohydrodynamic Stimulation Using Downhole Gas Generators Based on Composite Solid Fuels: Experimental and Numerical Analysis. *Fuel*. 2017; 205: 145-158.
- Решетников СМ, Фролов ВМ. Современные подходы к моделированию процесса горения смесового твердого топлива. *Бутлеровские сообщения*. 2012; 30 (6): 1-25. [Reshetnikov SM, Frolov VM. Modern Approaches to Modeling the Combustion Process of Composite Solid Fuel. *Butlerov Communications*. 2012; 30 (6): 1-25. (In Russ.)].
- Тиссо Б, Вельте Д. Образование и распространение нефти. Москва, 1981: 501. [Tissot B., Welte D. Formation and Distribution of Oil. Moscow, 1981: 501. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ, Сафиуллин РИ. Изучение зависимости скорости горения аммиачно-селитренного топлива от эксплуатационных характеристик его заряда с использованием нейросетевых технологий. *Вестник технологического университета*. 2017; 20 (18): 127-129. [Mukhutdinov AR, Efimov MG, Safiullin RI. Study of the dependence of the combustion rate of ammonium nitrate fuel on the operational characteristics of its charge using neural network technologies. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20 (18): 127-129. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ. Компьютерное моделирование теплообмена хлорбензола в электрическом поле. *Вестник Казанского технологического университета*. 2014; 17 (24): 138-140. [Mukhutdinov AR, Efimov MG. Computer modeling of chlorobenzene heat transfer in an electric field. *Bulletin of the Kazan. technological University*. 2014; 17 (24): 138-140. (In Russ.)].
- Мухутдинов АР, Ефимов МГ, Сафиуллин РИ и др. Программный модуль на основе нейронной сети для прогнозирования скорости горения смесового твердого топлива. *Вестник технологического университета*. 2017; 20 (24): 102-104. [Mukhutdinov AR, Efimov MG, Safiullin RI, et al. Software module based on neural network for predicting the combustion rate of mixed solid fuel. *Bulletin of the Technological University*. 2017; 20 (24): 102-104. (In Russ.)].
- Kim Seongmin, Xu Jiaxin, Shang Wenjie, et al. A review on machine learning-guided design of energy materials. *Progress in Energy*. 2024; 6 (4): 042005. DOI: 10.1088/2516-1083/ad7220.
- Alkinani Husam H., et al. Applications of Artificial Neural Networks in the Petroleum Industry: A Review. *Society of Petroleum Engineers*. 2019. DOI: 10.2118/195072-MS.
- Shen Fei, Ren Shuang, Zhang Xiang, et al. A Digital Twin-Based Approach for Optimization and Prediction of Oil and Gas Production. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021: 1-8. DOI: 10.1155/2021/3062841.
- Gao Fengyu, Tang Xiaolong, Yi Honghong, et al. A Review on Selective Catalytic Reduction of NO_x by NH_3 over Mn-Based Catalysts at Low Temperatures: Catalysts, Mechanisms, Kinetics and DFT Calculations. *Catalysts*. 2017; 7: 199. DOI: 10.3390/catal7070199.
- Sun Qian, Zhang na, Liu Wei, et al. Insights into enhanced oil recovery by thermochemical fluid flooding for ultra-heavy reservoirs: An experimental study. *Fuel*. 2023; 331: 125651. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.125651.
- Davis ME, Davis RJ. Fundamentals of Chemical Reaction Engineering. *McGraw-Hill*. 2003: 784.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Максим Геннадьевич Ефимов –

старший преподаватель кафедры компьютерного моделирования и техносферной безопасности ЧОУ ВО «Казанский инновационный университет имени В. Г. Тимирязова», 420111, Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация, e-mail: jero07@bk.ru

Аглям Рашидович Мухутдинов –

д-р техн. наук, профессор кафедры технология твердых химических веществ ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, Российская Федерация, e-mail: muhutdinov@rambler.ru

ABOUT THE AUTHORS

Maksim G. Efimov –

Senior Lecturer, Department of Computer Modeling and Technosphere Safety, Private Educational Institution of Higher Education “Kazan Innovative University named after V.G. Timiryasov”, 420111, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation, e-mail: jero07@bk.ru

Aglyam R. Mukhutdinov –

Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technology of Solid Chemicals, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University”, 420015, Republic of Tatarstan, Kazan, Russian Federation, e-mail: muhutdinov@rambler.ru

Критерии авторства / Contribution:

А. Р. Мухутдинов – научное руководство, концепция исследования; М. Г. Ефимов – написание исходного текста, проведение анализа данных, разработка итоговых выводов / A. R. Mukhutdinov – scientific guidance, research concept; M. G. Efimov – writing the source text, data analysis, development of final conclusions.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.06.2025.

Поступила после рецензирования: 18.07.2025.

Принята к публикации: 08.08.2025.

Article info

Received: 11.06.2025.

Revised: 18.07.2025.

Accepted: 08.08.2025.