

А. А. Филимонова, Р. Ф. Камалиева, А. Ю. Власова

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДсорбЕНТОВ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ И ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СЕРОСОДЕРЖАЩЕГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Ключевые слова: месторождения природного газа, серосодержащий природный газ, адсорбционная очистка от сероводорода, экономическая эффективность, адсорбент, промышленные отходы, шлам водоподготовительной установки.

Россия – мировой лидер по запасам природного газа. Основные месторождения находятся в Западной Сибири, значительные запасы также расположены в Поволжье, на Урале, в Северо-Кавказском регионе, Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. В настоящее время активно развиваются проекты освоения арктических месторождений, хотя потенциал арктического шельфа раскрыт лишь частично. Природный газ Оренбургского и Астраханского газоконденсатных месторождений характеризуется значительным содержанием сероводорода, поэтому для снижения коррозионных процессов и экологических рисков требует очистки от сернистых соединений. Исследование посвящено оценке технико-экономической эффективности адсорбционной очистки серосодержащих природных газов российских месторождений с использованием новых сорбентов на основе промышленных отходов и природных материалов. В работе представлены разработанные сорбционные составы, активной основой которых выступает прокаленный шлам водоподготовительной установки тепловой электрической станции, результаты проведенных экспериментальных исследований по определению их сероемкости, а также рассчитана себестоимость каждого предложенного сорбента. Для сравнительного сопоставления разработанных составов с промышленными аналогами были проведены эксперименты по улавливанию сероводорода адсорбентом-поглотителем АСВ-22. Для прогнозирования необходимой массы загрузки и времени работы адсорбентов были проведены расчеты по очистке природного газа с последующей его подачей на газовую турбину мощностью 10 МВт. Результаты показали, что разработанные адсорбенты обладают большей адсорбционной емкостью по сравнению с промышленным образцом при значительно меньшей стоимости, демонстрируя потенциал использования промышленных отходов для создания экономичных и эффективных сорбентов для очистки природного газа от сероводорода.

А. А. Filimonova, R. F. Kamaliev, A. Y. Vlasova

TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION FOR THE USE OF ADSORBENTS BASED ON INDUSTRIAL WASTE AND NATURAL MATERIALS FOR THE PURIFICATION OF SULFUR-CONTAINING NATURAL GAS

Keywords: natural gas deposits, sulfur-containing natural gas, adsorption purification from hydrogen sulfide, economic efficiency, adsorbent, industrial waste, sludge from a water treatment plant.

Russia is the world leader in natural gas reserves. The main deposits are located in Western Siberia, with significant reserves also found in the Volga region, the Urals, the North Caucasus region, Eastern Siberia, and the Far East. Projects to develop Arctic deposits are currently being actively pursued, although the potential of the Arctic shelf has only been partially revealed. Natural gas from the Orenburg and Astrakhan gas condensate fields has a significant hydrogen sulfide content, so it needs to be purified of sulfur compounds to reduce corrosion and environmental risks. This study is devoted to assessing the technical and economic efficiency of adsorption purification of sulfur-containing natural gases from Russian fields using new sorbents based on industrial waste and natural materials. The paper presents the developed sorption compositions, the active base of which is calcined sludge from the water treatment plant of a thermal power plant, the results of experimental studies to determine their sulfur capacity, and the cost of each proposed sorbent. To compare the developed compositions with industrial analogues, experiments were conducted on the capture of hydrogen sulfide using the ASV-22 adsorbent-absorber. To predict the required loading mass and operating time of the adsorbents, calculations were made for the purification of natural gas with its subsequent supply to a 10 MW gas turbine. The results showed that the developed adsorbents have a higher adsorption capacity compared to the industrial sample at a significantly lower cost, demonstrating the potential for using industrial waste to create economical and effective sorbents for purifying natural gas from hydrogen sulfide.

Введение

На сегодняшний день Россия является мировым лидером по запасам природного газа, распределенным по нескольким ключевым регионам. В Западной Сибири расположены крупнейшие месторождения, обеспечивающие до 80% российской добычи благодаря высокому содержанию метана (95–98%) и отработанным технологиям эксплуатации в условиях вечной мерзлоты. Также значительные запасы расположены

в Поволжье, на Урале, в Северо-Кавказском регионе, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. Наибольший потенциал для новых открытий связан с Восточной Сибирью, полуостровом Ямал и Арктическим шельфом. В последние годы активно развиваются проекты освоения арктических месторождений. Однако эти проекты раскрывают лишь часть ресурсов российского арктического шельфа [1-3]. На рисунке 1 изображено распределение запасов природного газа по регионам Российской Федерации.



Рис. 1 – Распределение запасов природного газа по регионам Российской Федерации

Fig. 1 – Distribution of natural gas reserves by region in the Russian Federation

Таблица 1 – Компонентный состав природного газа

Table 1 – Component composition of natural gas

Месторождение	Содержание компонентов, % (об.)							
	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ S
Оренбургское	4,8	85,1	3,8	0,6	1,7	0,8	1,5	1,7
Покровское	22,94	66,99	5,2	0,1	1,97	2,6	0	0,2
Астраханское	1,98	47,48	1,92	21,55	0,93	1,06	2,58	22,5

Исходя из количества добываемого газа и разведанных месторождений, запасов природного газа хватит на 98 лет, поэтому, несмотря на большие запасы малосернистых газов, природный газ Оренбургского, Покровского и Астраханского месторождений представляет большой интерес в сфере энергетики. Однако, серосодержащие компоненты инициализируют коррозионные процессы основного и вспомогательного оборудования и оказывают негативное влияние на процессы переработки и транспортировки газа. Также необходимость тщательной очистки природного газа от сернистых соединений обосновывается требованиями ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия» [5].

Адсорбционная очистка представляет собой ключевую технологию для удаления разнообразных примесей из газообразных топлив. Главным экономическим преимуществом адсорбции является ее высокая эффективность в достижении необходимых физико-химических показателей газообразного топлива в соответствии с ГОСТ 5542-2014. Технология позволяет снижать концентрации вредных примесей – сероводорода, диоксида углерода, меркаптанов – до очень низких уровней, благодаря чему снижается коррозия оборудования, что напрямую увеличивает срок их службы и сокращает расходы на ремонт и замену. Использование очищенного топлива также обеспечивает соответствие жестким экологическим нормам и минимизирует выбросы загрязняющих веществ (SO_x, NO_x, твердых частиц). Стоит отметить, что удаление балластных компонентов, таких как CO₂, повышает теплоту сгорания газа, увеличивая его энергетическую ценность [6].

Гибкость и селективность процесса адсорбции являются еще одним важным экономическим

Общей характеристикой газов, добываемых на газовых месторождениях, является высокое содержание метана от 75 до 98 % и высокая теплотворная способность. Содержание тяжелых углеводородов невелико. Наряду с углеводородами, большинство природных газов содержит 1-5% неуглеводородных примесей. Кроме этих примесей, природные газы газовых и газоконденсатных месторождений содержат в небольших количествах гелий, аргон, сероуглеродные, а также сероорганические соединения. Однако газы двух крупных газоконденсатных месторождений, Оренбургского и Астраханского, отличаются значительным содержанием сероводорода (табл. 1) [4].

фактором. Возможность выбора оптимального адсорбента для удаления конкретных примесей позволяет эффективно решать задачу очистки, сохраняя энергетически ценные компоненты. Технология эффективно работает в широком диапазоне концентраций примесей. Кроме того, эксплуатационные расходы адсорбционных установок часто оказываются конкурентоспособными, особенно по сравнению с абсорбционными методами. Основные эксплуатационные расходы – энергозатраты на регенерацию адсорбента (нагрев, продувка, вакуумирование, окисление). Однако они, как правило, ниже, чем затраты на рециркуляцию и регенерацию больших объемов адсорбентов в абсорбционных колоннах. Расходы на сорбционные материалы также относительно невелики: качественные адсорбенты имеют длительный срок службы, а их замена обходится дешевле, чем постоянная покупка химических реагентов в больших объемах. Важно и то, что адсорбция, в отличие от мокрых скрубберов, дает экономию на водоподготовке и очистке стоков. Надежность и простота эксплуатации адсорбционной технологии также вносят вклад в ее экономику. Автоматизация циклов адсорбции и регенерации обеспечивает стабильную работу, снижая затраты на обслуживание и простои [7-8].

Основные затраты при внедрении адсорбционной очистки включают капитальные вложения и эксплуатационные расходы. К капитальным вложениям относятся стоимость самих адсорберов, затраты на начальную загрузку адсорбента, систему регенерации, систему управления и автоматизации, а также вспомогательное оборудование (насосы, компрессоры, холодильники), проектирование и монтаж. Основные эксплуатационные затраты – это энергозатраты, затраты на периодическую замену адсорбента, техническое обслуживание и ремонт

оборудования и утилизацию отработанного адсорбента.

Экономическая эффективность конкретной адсорбционной установки зависит от множества факторов. Состав и давление исходного газа играют ключевую роль: высокие концентрации примесей требуют больше адсорбента и более частой регенерации, а высокое давление газа снижает размеры и стоимость оборудования. Объем перерабатываемого газа определяет масштаб: экономика улучшается с его ростом за счет снижения удельных капитальных затрат. Выбор типа и стоимости адсорбента критичен для оптимизации затрат. Схема регенерации существенно влияет на энергопотребление и потери продукта. Конкурентоспособность адсорбции также зависит от стоимости альтернативных технологий и ужесточения экологических норм.

При сравнении с основными альтернативными технологиями адсорбция демонстрирует свои сильные стороны. Адсорбция аминами подходит для больших объемов и высоких концентраций углекислого газа и сероводорода, но страдает от высоких эксплуатационных затрат, больших габаритов, сложности достижения высокой чистоты и проблем с утилизацией отходов [9]. Мембранное разделение отличается низкими капитальными и эксплуатационными расходами и компактностью для некоторых задач, но имеет такие недостатки как чувствительность к загрязнениям, ограниченную селективность, необходимость высокого давления и потери ценного газа в пермеат. Криогенные методы обеспечивают наивысшую чистоту и могут производить сжиженные продукты, но требуют очень высоких капитальных и эксплуатационных затрат из-за высоких энергозатрат на охлаждение и сложности, оправдывая себя преимущественно на крупных объектах.

Таким образом, адсорбционная очистка экономически обоснована и часто является наиболее выгодным решением в случаях, когда требуется высокая степень очистки, необходима одновременная очистка от нескольких примесей, обрабатываются средние или малые объемы газа, требуется глубокая осушка, либо необходимо удаление следов тяжелых углеводородов или ртути из природного газа. Экономический итог заключается в том, что адсорбция предлагает оптимальное сочетание эффективности, гибкости, умеренных капитальных затрат и конкурентоспособных эксплуатационных расходов для широкого спектра задач. Хотя первоначальные инвестиции могут быть значительными, они обычно окупаются за счет снижения затрат на ремонт оборудования, повышения энергоэффективности топлива, соответствия экологическим стандартам и увеличения срока службы катализаторов в последующих процессах.

В связи с вышесказанным целью исследования является разработка технологии подготовки серосодержащего газообразного топлива для газовых турбин в условиях возможного углеводородного кризиса. Научная новизна заключается в создании

новых сорбционных составов из отходов промышленности и энергетики в условиях экономики замкнутого цикла, а практическая значимость отражается в снижении экономических затрат на очистку природного газа от сероводорода.

Материалы и методы

Для снижения экономических затрат актуально использование адсорбентов на основе промышленных отходов и природных материалов [10-13]. Основными компонентами шлама водоподготовительной установки теплоэлектростанции шлама являются карбонат и гидроксид кальция, магния, железа и алюминия, дополнительно в нем содержатся ионы меди, цинка, никеля, марганца, хрома, карбонат-ионы, сульфат-ионы, гидроксид-ионы, силикат-ионы, фосфат-ионы, а также шлам характеризуется щелочными свойствами [14-15]. Поэтому шлам ВПУ способен химически взаимодействовать с сероводородом и оксидами серы, образуя труднорастворимые сульфиды и сульфаты и представляет интерес для использования его в качестве одного из компонентов сорбционного материала.

В сорбционных составах использовался как обезвоженный, так и прокаленный шлам. Прокаливание проводилось в муфельной печи при температуре 1000 °С в течении 2 часов. Остывание шлама проводилось при равномерном снижении температуры. Далее все компоненты перемешивали до образования равномерной суспензии, гранулировали и высушивали (рис. 2-5).



Рис. 2 – Шлам прокаленный 50%, NaOH 8,5%, красная глина 41,5%

Fig. 2 – Sludge calcined 50%, NaOH 8.5%, red clay 41.5%

Оценка сорбционной емкости разработанных составов проводилась в лабораторных условиях методом динамической адсорбции. Сероводород генерировался непосредственно в адсорбционной установке путем химической реакции между сульфидом натрия и кислотой. Образовавшийся газ смешивался с воздухом и далее направлялся через адсорбер, заполненный исследуемым сорбционным составом. Для улавливания сернистых соединений, не поглощенных адсорбентом, газовая смесь на выходе из адсорбера пропускалась через поглотительный раствор ацетата цинка.

Количественный анализ содержания сернистых соединений в этом поглотительном растворе выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 22387.2-2021 «Газ природный. Методы определения сероводорода и меркаптановой серы». Процесс адсорбции завершался, когда, согласно спектрофотометрическому определению, содержание сульфидов в поглотительном растворе превышало 100 мкг.



Рис. 3 – Шлам прокаленный 70%, NaOH 8,5%, ZnO 21,5%

Fig. 3 – Sludge calcined 70%, NaOH 8.5%, ZnO 21.5%



Рис. 4 – Шлам прокаленный 50%, шлам непрокаленный 10%, NaOH 8,5%, Fe₂O₃ 31,5%

Fig. 4 – 50% calcined sludge, 10% uncalcined sludge, 8.5% NaOH, 31.5% Fe₂O₃



Рис. 5 – Шлам прокаленный 50%, NaOH 8,5%, Fe₂O₃ 41,5%

Fig. 5 – Sludge calcined 50%, NaOH 8.5%, Fe₂O₃ 41.5%

Также для сравнительного анализа в экспериментах использовался промышленный адсорбент-поглотитель АСВ-22, изготовленный на основе природного материала и содержащий в основном гидроксидные соединения марганца, железа и других металлов.

В последнее время в связи с развитием автономной энергетики все более актуально использование газовых турбин малой мощности. Поэтому для анализа экономической эффективности очистки природного газа Оренбургского, Покровского, Астраханского месторождений разработанными сорбентами была выбрана газовая турбина мощностью 10 МВт.

Для расчета массы загрузки адсорбента и времени его работы использовались формулы 1-4.

Диаметр адсорбера рассчитывается следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi W_{\text{раб}}}}, \quad (1)$$

где V – объемный расход природного газа, м³/ч; $W_{\text{раб}}$ – рабочая скорость газа в адсорбере, рассчитанная по формуле:

$$W_{\text{раб}} = 0,75 \cdot W_{\text{доп}} = 0,75 \cdot \sqrt{0,0167 \cdot \rho_{\text{нас}} d_0 g / \rho_y}, \quad (2)$$

где $W_{\text{доп}}$ – допустимая фиктивная скорость газа, м/с; $\rho_{\text{нас}}$ – насыпная плотность адсорбента, кг/м³; d_0 – эквивалентный диаметр гранул, м; ρ_y – плотность воздуха при температуре адсорбции, кг/м³; g – ускорение свободного падения.

Необходимая масса загрузки адсорбента определялась по формуле:

$$m = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2 \cdot H \cdot \rho_{\text{нас}}, \quad (3)$$

где H – Высота слоя адсорбента в аппарате, принимаемая 1,5 м.

Время работы адсорбента прогнозировалось по формуле:

$$\tau = \frac{m \cdot \alpha}{c \cdot V}, \quad (4)$$

где α – сероемкость адсорбента кг/кг, c – концентрация сероводорода в газе, кг/м³.

Обсуждение результатов

В таблицу 2 сведены составы разработанных адсорбентов, их сорбционная емкость по результатам экспериментальных исследований и себестоимость за 1 т.

Анализ состава, сероемкости и себестоимости разработанных адсорбентов показал значительные различия в их характеристиках. Адсорбент №4 обладает самой высокой сероемкостью, значительно превосходя все остальные образцы, включая промышленный аналог. Однако его себестоимость также является высокой, за счет высокого содержания оксида железа. Себестоимость адсорбента №2 самая высокая из всех представленных и обуславливается содержанием оксида цинка в составе.

Таблица 2 – Сероемкость и себестоимость адсорбентов**Table 2 – Sulfur capacity and cost of adsorbents**

№	Состав	Сероем- кость, мг/г	Стоимость, руб./т
1	Шлам прокаленный 50%, NaOH 8,5%, красная глина 41,5%	312,1	10708
2	Шлам прокаленный 70%, NaOH 8,5%, ZnO 21,5%	387,6	89438
3	Шлам прокаленный 50%, шлам непрокаленный 10%, NaOH 8,5%, Fe ₂ O ₃ , 31,5%	413,3	56023
4	Шлам прокаленный 50%, NaOH 8,5%, Fe ₂ O ₃ 41,5%	980,0	70423
5	Адсорбент- поглотитель АСВ-22	281,5	≈100000

Состав №1 состоит в основном из промышленного отхода и природного материала, тем самым обеспечивая минимальные экономические

затраты, однако также характеризуется наименьшей сорбционной емкостью по сероводороду. Образец №3 демонстрирует относительно высокую сероемкость при умеренной себестоимости, представляя потенциальный компромисс между эффективностью и экономичностью. Промышленный адсорбент АСВ-22, несмотря на высокую стоимость, обладает сероемкостью ниже, чем у разработанных составов.

Расчетные значения массы и стоимости загрузки и времени работы адсорбента сведены в таблицу 3.

Для природного газа Покровского месторождения, характеризующегося относительно невысоким содержанием сероводорода, ключевым критерием выбора адсорбента является минимизация экономических затрат на очистку. Состав №1 демонстрирует самую низкую себестоимость среди всех рассмотренных вариантов. Хотя его сорбционная емкость не является максимальной, она достаточна для эффективной очистки газа с невысокой концентрацией H₂S. Использование доступной красной глины вместо дорогостоящих оксидов металлов выступает основным фактором экономичности и экологичности данного состава.

Таблица 3 – Параметры загрузки адсорбента**Table 3 – Adsorbent loading parameters**

Месторождение	Адсорбент	Масса, кг	Стоимость, руб.	Время работы, ч	Стоимость руб./ч
Оренбургское	Состав №1	1315	14081	5 ч 42 мин	2470
	Состав №2	1310	117164	7 ч	16737
	Состав №3	1309	73334	7 ч 33 мин	9713
	Состав №4	1508	106197	20 ч 36 мин	5155
	АСВ-22	3102	310200	12 ч 12 мин	25426
Покровское	Состав №1	1315	14081	48 ч 42 мин	289
	Состав №2	1310	117164	60 ч 18 мин	1943
	Состав №3	1309	73334	64 ч 15 мин	1140
	Состав №4	1508	106197	175 ч 30 мин	605
	АСВ-22	3102	310200	103 ч 30 мин	2997
Астраханское	Состав №1	1315	14081	26 мин	32519
	Состав №2	1310	117164	32 мин	234328
	Состав №3	1309	73334	1 ч 21 мин	58667
	Состав №4	1508	106197	1 ч 30 мин	70798
	АСВ-22	3102	310200	1	310200

В случае газа Оренбургского месторождения, где предполагается более высокое содержание сероводорода, требующее большей сорбционной емкости, актуальны составы №2 и №3. Оба обладают более высокой сероемкостью по сравнению с составом №1. В состав №2 входит оксид цинка, известный как высокоэффективный компонент для очистки от сероводорода, обеспечивающий отличную емкость и селективность, однако его применение значительно увеличивает себестоимость адсорбента. В свою очередь, состав №3 является более привлекательным вариантом, за счет применения менее дорогого оксида железа и высокой сероемкости при достаточно низкой себестоимости.

Для очистки высокосернистых газов, содержащих меркаптаны, наилучшим решением является состав №4. Он демонстрирует исключительно высокую сероемкость, кратно превышающую показатели других составов. Высокая сорбционная способность связана с долей оксида железа, который известен не только способностью к адсорбции H₂S, но и к каталитическому окислению и химическому связыванию меркаптанов. Однако природный газ Астраханского месторождения требует предварительной очистки или внедрения дополнительных технологий.

Заключение

Исследование подтвердило высокий потенциал использования промышленных отходов в качестве активного компонента для создания эффективных и экономичных адсорбентов сероводорода. Для каждого месторождения необходимо индивидуально подбирать сорбционный материал в зависимости от компонентного состава природного газа для достижения равенства экономичности и эффективности очистки. Использование разработанных адсорбентов на основе шлама водоподготовительной установки позволяет существенно снизить экономические затраты на сорбционный материал, повысить ресурсосбережение и утилизировать промышленные отходы, обеспечить очистку природного газа до требований ГОСТ 5542-2014, снизить коррозию оборудования и эксплуатационные расходы.

Благодарности

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00026 https://grant.rscf.ru/site/user/forms?rid=000000000000010379092-1_.

Литература

1. Е.З. Шоров, *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*, **3**(96), 178-183 (2023). DOI 10.37493/2307-907X.2023.3.20.
2. Р.Г. Касаткин, *Региональная экономика: теория и практика*, **12**, 24-25 (2007).
3. М.А. Винокуров, *Известия Иркутской государственной экономической академии*, **2**, 24-30 (2009).
4. Ю.Г. Чуркин, С.В. Нефедов, *Вестник науки*, **1**, 6(87), 2180-2187 (2025).
5. ГОСТ 5542-2014 «Газы горючие природные промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия».
6. Т.О. Самакаева, *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*, **2**, 29-35 (2013).
7. Б.Ж. Сафаров, С.Б. Усмонов, А.Р. Хафизов, Б.Н. Сирожов, *Universum: технические науки*, **11-6**(104), 5-11 (2022).
8. Б.Ж. Сафаров, Б.Х. Саломов, И.И. Элов, Ф.К. Рузикулов, *Наука и образование сегодня*, **2**(3), 9-11 (2016).
9. А.Б.У. Кобиллов, М.Я. Хужжиев, *Вопросы науки и образования*, **11**(12), 25-26 (2017).
10. W. Ahmad, S. Sethupathi, G. Kanadasan, L.C. Lau, R. Kanthasamy, *Rev. Chem. Eng.*, **37**, 3, 407-431 (2021). DOI: 10.1515/revce-2018-0048.
11. D. Papurello, A. Lanzini, M. Bressan, M. Santarelli, *Processes*, **8**(2), 130 (2020). DOI: 10.3390/pr8020130.
12. I. Iliev, A. Filimonova, A. Chichirov, A. Vlasova, R. Kamaliev, I. Beloev, *Fuels*, **6**, 1, 13 (2025). DOI: 10.3390/fuels6010013.
13. Пат. РФ 2757115 (2021).
14. Пат. РФ 2541081 (2015).
15. B. Xie, N. Geng, Q. Yu, D. He, F. Wang, T. Liu, J. Gao, P. Ning, X. Song, L. Jia, *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(11), 15642-15653, (2021). DOI: 10.1007/s11356-021-16842-7.
16. А.А. Филимонова, А.Ю. Власова, Р.Ф. Камалиева, *Проблемы региональной энергетики*, **1**(65), 135-145 (2025). DOI 10.52254/1857-0070.2025.1-65.10.

References

1. E.Z. Shorov, *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, **3**(96), 178-183 (2023). DOI 10.37493/2307-907X.2023.3.20.
2. R.G. Kasatkin, *Regional Economics: Theory and Practice*, **12**, 24-25 (2007).
3. M.A. Vinokurov, *News of the Irkutsk State Economic Academy*, **2**, 24-30 (2009).
4. Yu.G. Churkin, S.V. Nefedov, *Bulletin of Science*, **1**, 6(87), 2180-2187 (2025).
5. GOST 5542-2014 "Natural combustible gases for industrial and domestic use. Technical conditions."
6. T.O. Samakaeva, *Environmental Protection in the Oil and Gas Complex*, **2**, 29-35 (2013).
7. B.Zh. Safarov, S.B. Usmonov, A.R. Khafizov, B.N. Sirozhov, *Universum: Technical Sciences*, **11-6**(104), 5-11 (2022).
8. B.Z. Safarov, B.Kh. Salomov, I.I. Elov, F.K. Ruzikulov, *Science and Education Today*, **2**(3), 9-11 (2016).
9. A.B.U. Kobilov, M.Ya. Khuzhzhiev, *Issues of Science and Education*, **11**(12), 25-26 (2017).
10. W. Ahmad, S. Sethupathi, G. Kanadasan, L.C. Lau, R. Kanthasamy, *Rev. Chem. Eng.*, **37**, 3, 407-431 (2021). DOI: 10.1515/revce-2018-0048.
11. D. Papurello, A. Lanzini, M. Bressan, M. Santarelli, *Processes*, **8**(2), 130 (2020). DOI: 10.3390/pr8020130.
12. I. Iliev, A. Filimonova, A. Chichirov, A. Vlasova, R. Kamaliev, I. Beloev, *Fuels*, **6**, 1, 13 (2025). DOI: 10.3390/fuels6010013.
13. Pat. RF 2757115 (2021).
14. Pat. RF 2541081 (2015).
15. B. Xie, N. Geng, Q. Yu, D. He, F. Wang, T. Liu, J. Gao, P. Ning, X. Song, L. Jia, *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(11), 15642-15653, (2021). DOI: 10.1007/s11356-021-16842-7.
16. A.A. Filimonova, A.Yu. Vlasova, R.F. Kamaliev, *Problems of Regional Energy*, **1**(65), 135-145 (2025). DOI 10.52254/1857-0070.2025.1-65.10.

© А. А. Филимонова – д.т.н., доцент, зав. кафедрой «Автономная распределенная энергетика и химия», Казанский государственный энергетический университет (КГЭУ), Казань, Россия, aachichirova@mail.ru; Р. Ф. Камалиева – инженер кафедры «Атомные и тепловые электрические станции» (АТЭС), КГЭУ; А. Ю. Власова – к.т.н., доцент кафедры АТЭС, КГЭУ.

© А. А. Filimonova – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Autonomous Distributed Energy and Chemistry, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), Kazan, Russia, aachichirova@mail.ru; R. F. Kamaliev – Engineer of the Department of Nuclear and Thermal Power Plants (NTPP), KSPEU; A. Yu. Vlasova – PhD (Technical Sci.), Associate Professor of the NTPP department, KSPEU.

Дата поступления рукописи в редакцию – 15.07.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.10.25.