

НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ

PETROLEUM ENGINEERING AND PROJECT MANAGEMENT

Научная статья
УДК 622.276.6+621.3.082.4
<https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-54-60>
EDN ESZLMP

Исследование технологии акустико-химического воздействия на различные горизонты пласта для интенсификации добычи нефти на примере месторождения Верблюжье в Астраханской области

Елена Валерьевна Егорова[✉], Виктор Владимирович Оленников

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, egorova_ev@list.ru[✉]*

Аннотация. В статье проводится анализ различных вариантов акустико-химического воздействия на различные горизонты пласта для интенсификации добычи нефти на примере месторождения Верблюжье в Астраханской области. В условиях истощения запасов легкой нефти возрастает значимость трудноизвлекаемых запасов, характерных для таких месторождений, как Верблюжье в Астраханской области. Его нефть обладает высокой вязкостью и значительным содержанием парафина, а продуктивные пласты имеют неоднородные коллекторские свойства. Основной проблемой является кольтизация призабойной зоны пласта, снижающая ее фильтрационно-емкостные свойства, что делает традиционные методы интенсификации добычи малоэффективными. Первые исследования по данной технологии появились в 1960-х гг. Постепенное развитие технологии, уточнение параметров акустического воздействия и разработка более эффективных химических реагентов привели к возможности применения данной технологии в процессе разработки месторождений. С начала 2000-х гг. появилось специализированное оборудование для применения на разных типах пластов и в различных условиях. Все эти улучшения позволяют эффективно использовать данную технологию на месторождениях со сложными условиями добычи нефти, высоковязкой и трудноизвлекаемой нефтью. В статье описан метод исследования акустико-химического воздействия на керн в лабораторных условиях. Описание метода позволяет повторить его на других месторождениях с различными условиями нефтеносных пластов и характеристиками нефти. Проведен анализ эффективности технологии с различными химическими реагентами, частотой и мощностью акустического воздействия и сделаны выводы об оптимальном режиме воздействия на продуктивный пласт месторождения Верблюжье в Астраханской области.

Ключевые слова: акустико-химическое воздействие, увеличение проницаемости, снижение вязкости нефти, продуктивность скважины, неоднородность коллекторских свойств

Для цитирования: Егорова Е. В., Оленников В. В. Исследование технологии акустико-химического воздействия на различные горизонты пласта для интенсификации добычи нефти на примере месторождения Верблюжье в Астраханской области // Нефтегазовые технологии и экологическая безопасность. 2025. № 4. С. 54–60. <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-54-60>. EDN ESZLMP.

Original article

A study of the technology of acoustic-chemical impact on various horizons of the reservoir to intensify oil production using the example of the Verblyuzhye field in the Astrakhan region

Elena V. Egorova[✉], Viktor V. Olennikov

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, egorova_ev@list.ru[✉]*

Abstract. The article analyzes various options for acoustic and chemical effects on various horizons of the reservoir to intensify oil production using the example of the Camel field in the Astrakhan region. In conditions of depletion of light oil reserves, the importance of hard-to-recover reserves, characteristic of fields such as Camel in the Astrakhan region, is increasing. Its oil has a high viscosity and a significant content of paraffin, and the productive formations have heterogeneous reservoir properties. The main problem is the colmatation of the bottom-hole zone of the formation, which reduces its filtration and capacitance properties, which makes traditional methods of mining intensification ineffective. The first research on this technology appeared in the 1960s. The gradual development of technology, the refinement of acoustic impact parameters and the development of more effective chemical reagents have led to the possibility of using this technology in the field development process. Since the early 2000s, specialized equipment has been available for use on different types of formations and in different conditions. All these improvements make it possible to effectively use this technology in fields with difficult oil production conditions, highly viscous and difficult-to-recover oil. The article describes a method for studying the acoustic and chemical effects on the core in the laboratory. The description of the method makes it possible to repeat it in other fields with different oil reservoir conditions and oil characteristics. The effectiveness of technology with various chemical reagents and different frequency and power of acoustic exposure is analyzed and draws conclusions about the optimal mode of exposure to the productive reservoir of the Camel deposit in the Astrakhan region.

Keywords: acoustic-chemical impact, increased permeability, decreased oil viscosity, well productivity, heterogeneity of reservoir properties

For citation: Egorova E. V., Olennikov V. V. A study of the technology of acoustic-chemical impact on various horizons of the reservoir to intensify oil production using the example of the Verblyuzhye field in the Astrakhan region. *Oil and gas technologies and environmental safety*. 2025;4:54-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/1812-9498-2025-4-54-60>. EDN ESZLMP.

Введение

Нефтедобывающая промышленность сталкивается с постоянным ухудшением условий разработки месторождений, связанных с истощением запасов легкой нефти и необходимостью вовлечения в эксплуатацию трудноизвлекаемых запасов. Месторождение Верблюжье в Астраханской области характеризуется именно такими условиями, здесь залегает высоковязкая нефть с плотностью от 0,74 до 0,97 г/см³ и содержанием парафина до 4,49 % [1]. Продуктивные пласты расположены на глубинах 870–1 445 м, общие извлекаемые запасы оцениваются от 8,73 до 17,5 млн т нефти.

Основной проблемой таких месторождений является снижение фильтрационно-емкостных свойств призабойной зоны пласта вследствие кольтатации порового пространства. Это происходит из-за проникновения фильтрата бурового раствора, механических примесей, отложения высоковязких компонентов нефти и глинистых частиц, образования неподвижных пленок жидкости на поверхности поровых каналов. Традиционные методы обработки призабойной зоны часто оказываются недостаточно эффективными и экономически нецелесообразными.

Акустико-химическое воздействие (АХВ) пред-

ставляет собой перспективное направление интенсификации добычи нефти, сочетающее физическое и химическое воздействие на пласт [2–4]. Его применение на конкретных месторождениях с уникальными геолого-физическими характеристиками требует дополнительных исследований для оптимизации параметров воздействия.

Технологии акустико-химического воздействия

Суть технологии АХВ состоит в одновременном закачивании в пласт раствора определенных химических реагентов и воздействия на пласт акустических колебаний различной частоты [3, 5]. Одновременное воздействие этих двух факторов дает синергетический эффект, превосходящий эффект воздействия каждого фактора по отдельности и возникающий вследствие того, что акустическое поле усиливает проникновение химических реагентов вглубь пласта и интенсифицирует химические реакции [2].

Объект исследования

Месторождение Верблюжье расположено в Харабалинском районе Астраханской области. Продук-

тивные пласты залегают на глубинах 870–1 445 м и характеризуются неоднородностью коллекторских свойств. Нефть отличается высокой вязко-

стью и значительным содержанием парафинов (табл. 1), что осложняет ее добычу традиционными методами [1].

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики нефти месторождения Верблюжье

Main characteristics of oil from the Verblyuzhye field

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	0,74–0,97
Содержание серы, %	0,55
Содержание парафина, %	4,49
Вязкость	Высокая

Методика исследования

Исследование проводилось с использованием комплексного подхода, включающего лабораторные эксперименты, математическое моделирование и анализ промысловых данных. Для исследования эффективности АХВ была разработана специализированная экспериментальная установка, моделирующая пластовые условия месторождения Верблюжье.

Установка включает следующие основные компоненты:

1) ячейка высокого давления типа Хассельбруха объемом 500 см³, изготовленная из нержавеющей стали марки 316L, с рабочим давлением до 50 МПа и температурой до 150 °С, оборудована сапфировыми окнами для визуального наблюдения за процессом;

2) система поддержания пластовых условий, включающая термостатирующую печь с точностью поддержания температуры $\pm 0,5$ °С, шприцевые насосы ISCO 500D для создания и поддержания давления, систему подогрева магистралей с термостатическим контролем;

3) акустическая система, состоящая из генератора низкочастотных колебаний ГП-5-300 (диапазон частот 20–5 000 Гц), пьезоэлектрических преобразователей ПК-100 с резонансной частотой 20–100 кГц, усилителя мощности АС-1000 (максимальная мощность – 1 кВт), системы акустической развязки и фокусировки излучения [6];

4) измерительный комплекс, включающий дифференциальный манометр ДМЦ-100 с точностью $\pm 0,1$ %, капиллярный вискозиметр Пинкевича, систему высокоскоростной видеорегистрации Phantom V2012, анализатор спектра акустических колебания СК4-59.

Исследование включало предварительный этап подготовки кернового материала: отбор кернов диаметром 30 мм и длиной 50–60 мм из продуктивных пластов БВ₈ и БВ₁₀; механическую очистку поверхности от бурового раствора; экстракцию остаточной нефти в аппарате Сокслета в течение 48 ч с использованием смеси толуол-этанол (70 : 30); сушку в вакуумном сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы. Затем производилось опреде-

ление физических характеристик образца: измерение пористости методом насыщения керна декалином под давлением 25 МПа; определение проницаемости по газу на приборе ППГ-1-3 при различных давлениях; ртутная порометрия на анализаторе пороразмерения AutoPore IV 9500.

Эксперименты проводились при смоделированных пластовых условиях: установка температуры 85 °С с точностью $\pm 0,5$ °С; поровое давление – 25 МПа; горное давление – 35 МПа [7, 8].

Производился непрерывный мониторинг давления цифровыми датчиками Keller PA-23SY, регистрация температуры термомпарами типа К с точностью $\pm 0,1$ °С.

Эксперимент включал три основных этапа.

1. Процедура акустической обработки. Включала циклическое воздействие на образец 5 мин обработки / 2 мин паузы. Изменение частоты воздействия от 20 до 5 000 Гц проходило ступенчато. Интенсивность излучения была установлена 1, 3, 5, 7 и 10 кВт/м². Время обработки – 1, 3, 6, 9 и 12 ч.

Производился мониторинг следующих параметров: регистрация акустической эмиссии пьезоэлектрическими датчиками; контроль температуры в режиме реального времени; измерение изменения электрического импеданса образца [6, 9].

2. Процедура химического воздействия. Приготовленные реагенты закачивались в образец со скоростью 0,1–2,0 мл/мин. Объем порции составлял 0,5–3,0 поровых объема. Температура реагента – 85 °С. Статическая выдержка – от 6 до 24 ч.

Проводился контроль изменения pH и электропроводности.

3. Комплексное акустико-химическое воздействие. Проводилась предварительная акустическая подготовка образца путем обработки низкоинтенсивным излучением (1 кВт/м²) в течение 1 ч с частотой 50–100 Гц, химическая пропитка путем закачки реагента со скоростью 0,5 мл/мин и выдержкой под давлением 3 ч.

Кроме этого, проводилось синхронное воздействие, включающее в себя одновременную закачку реагента и акустическое воздействие различной частоты и интенсивности [2, 4].

Контроль и анализ образцов после указанных воздействий включал: реологические исследования (определение параметров моделей Оствальда, Гершеля-Балкли, Бингема); структурный анализ образцов с использованием электронной микроскопии; рентгеноструктурный анализ на дифрактометре; ИК-Фурье спектроскопию; гидродинамические исследования, включая измерение фазовых проницаемостей, определение капиллярного давления, ртутную порометрию с определением распределения пор по размерам.

Обработка результатов проводилась в программном комплексе Statistica 12.0.

Разработанная детальная методика обеспечивает воспроизводимость результатов и позволяет проводить комплексные исследования эффектив-

ности акустико-химического воздействия на различных режимах.

Результаты исследования

Воздействие химических реагентов

Эксперименты показали, что наибольшей эффективностью в условиях месторождения Верблюжье обладают композиции на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ) и углеводородных растворителей. Они обеспечивают снижение вязкости нефти и разрушение парафиновых отложений (табл. 2). Важным условием является отсутствие водной фазы и содержание ароматических углеводородов как мощных растворителей смол, асфальтенов и парафинов [3].

Таблица 2

Table 2

Эффективность различных химических реагентов

Efficiency of various chemical reagents

Тип реагента	Снижение вязкости нефти, %	Увеличение проницаемости, %	Примечания
Катионактивные ПАВ	25–30	15–20	Для добывающих скважин
Анионактивные ПАВ	20–25	10–15	Для нагнетательных скважин
Неионогенные ПАВ	15–20	10–12	Универсальное применение
Углеводородные растворители	35–40	25–30	Требуют отсутствия водной фазы
Кислотные составы	10–15	8–12	Ограниченная эффективность

Воздействие акустических волн

Исследование влияния акустических волн различных частот показало, что низкочастотное воздействие (20–200 Гц) наиболее эффективно для разрушения прочных отложений и увеличения прони-

цаемости коллектора, в то время как высокочастотное воздействие (5–20 кГц) лучше справляется с удалением мелкодисперсных частиц и разрушением пристенных слоев жидкости (рис. 1) [5, 6].

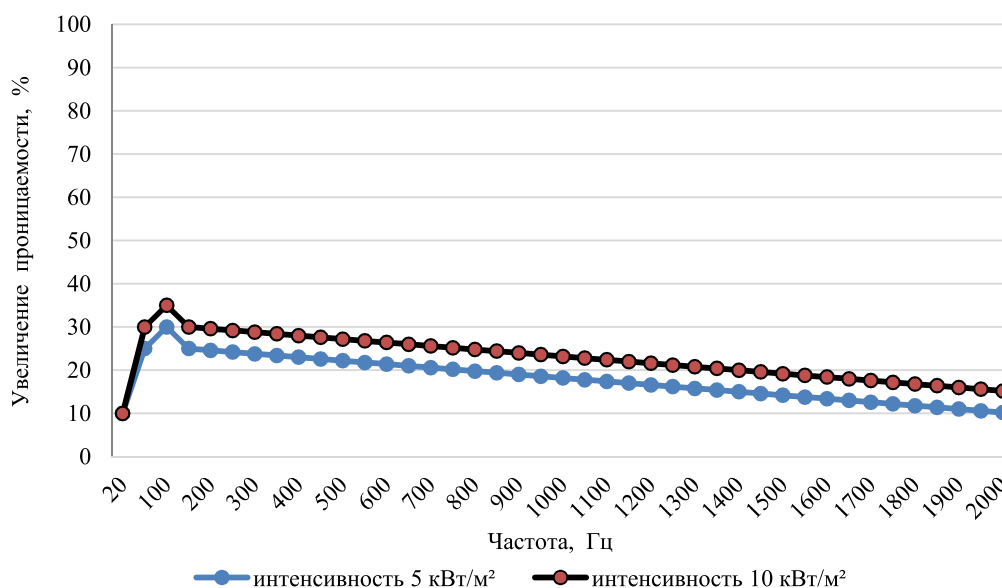


Рис. 1. Зависимость увеличения проницаемости от частоты акустического воздействия

Fig. 1. Dependence of the increase in permeability on the frequency of acoustic impact

Комплексное акустико-химическое воздействие

Наибольший эффект достигнут при комбинации акустического и химического воздействий.

Синергетический эффект проявляется в том, что акустическое поле усиливает проникновение химических реагентов вглубь пласта и интенсифицирует химические реакции (табл. 3) [2–4].

Таблица 3

Table 3

Результаты комплексного акустико-химического воздействия

Results of complex acoustic-chemical impact

Тип воздействия	Увеличение проницаемости, %	Снижение вязкости нефти, %	Прирост дебита, %
Химическое	15–30	20–40	25–35
Акустическое	10–20	15–25	20–30
Комплексное воздействие	30–50	40–60	45–70

Эксперименты подтвердили, что комплексное АХВ позволяет достичь увеличения дебита скважин на 45–70 % с продолжительностью эффекта не менее 1–1,5 года.

Экономический анализ показал, что применение

технологии АХВ на месторождении Верблюжье экономически целесообразно. Прирост дополнительной добычи нефти составляет 1,5–2,0 тыс. т на скважину в год (рис. 2), а срок окупаемости технологии не превышает 6–8 месяцев [1].

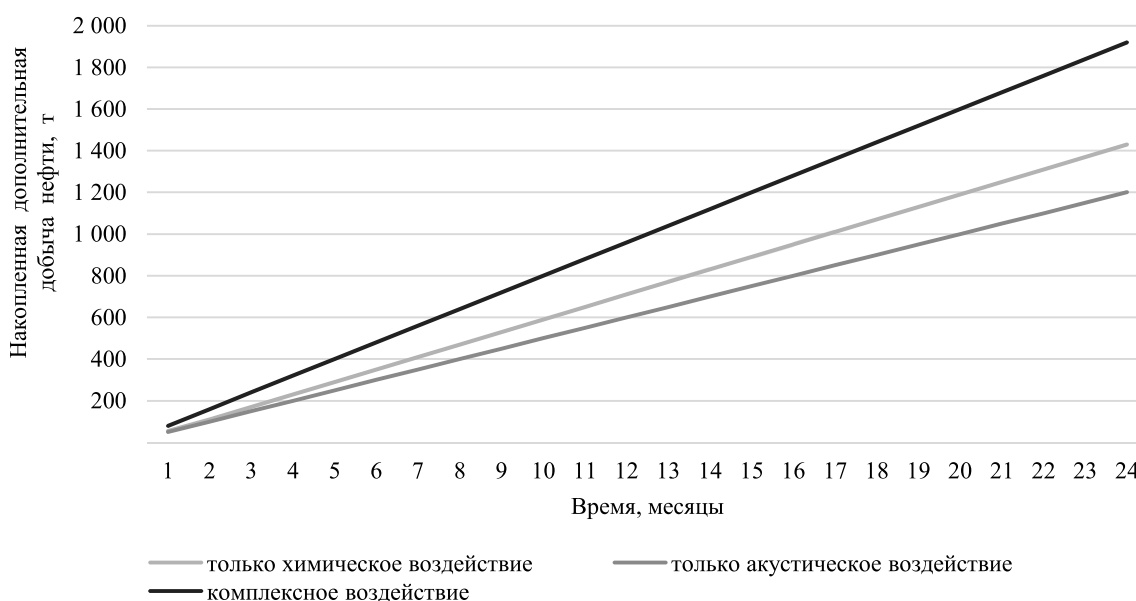


Рис. 2. Динамика дополнительной добычи нефти после применения акустико-химического воздействия

Fig. 2. Dynamics of additional oil production after the use of acoustic-chemical impact

Выводы

Результаты исследования демонстрируют высокую эффективность технологии АХВ для условий месторождения Верблюжье. Механизм воздействия включает несколько одновременных процессов:

- 1) деструкцию пристенных слоев жидкости за счет знакопеременных нагрузок и высоких градиентов давления [6, 9];
- 2) диспергирование и вынос кольматантов из по-

рового пространства;

3) снижение вязкости нефти за счет разрушения ее реологической структуры и деполяризации молекул [3];

4) изменение смачиваемости поверхности пор и снижение сил поверхностного натяжения;

5) ускорение химических реакций между реагентами и отложениями в пласте [2].

Важным преимуществом технологии является ее экологическая безопасность по сравнению с некоторыми другими методами увеличения нефтеотдачи. Кроме того, технология позволяет избирательно воздействовать на различные интервалы продуктивного разреза, что особенно важно для неоднородных пластов месторождения Верблюжье [5].

Одним из ключевых факторов успешного применения технологии является правильный подбор параметров воздействия для конкретных условий. Для месторождения Верблюжье рекомендованы следующие параметры:

1) частота акустического воздействия: для низко-

проницаемых зон – 50–100 Гц; для высокопроницаемых зон – 100–500 Гц;

2) интенсивность – 5–10 кВт/м²;

3) продолжительность воздействия – 4–6 ч;

4) состав химических реагентов: композиции на основе ПАВ и углеводородных растворителей с добавлением ингибиторов коррозии и стабилизаторов [3, 4].

Предложенная технология адаптирована для конкретных условий месторождения Верблюжье и учитывает особенности залегания нефти, ее физико-химические свойства и характеристики коллектора [1, 10].

Список источников

1. На Верблюжьем нефтяном месторождении в Астраханской области будут обустроены участки добычи. URL: <https://neftegaz.ru/news/oilfield/755085-na-verblyuzhem-neftyanom-mestorozhdenii-v-astrakhanskoy-oblasti-budut-obustroeny-uchastki-dobychi/> (дата обращения: 01.11.2025).

2. Грубов А. И. Разработка и внедрение технологий комплексного акустико-химического и имплозионного воздействия на призабойную зону пласта при освоении и стимуляции скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 1999. 22 с.

3. Акустико-химическое воздействие (АХВ). Условия успешного применения акустических методов. Преимущества и недостатки технологий АХВ. Сейсмоакустическое воздействие (САВ). Эффекты при САВ. URL: <https://studfile.net/preview/7667264/page:13/> (дата обращения: 01.11.2025).

4. Грубов А. И. Разработка и внедрение технологий комплексного акустико-химического и имплозионного воздействия на призабойную зону пласта при освоении и стимуляции скважин: дис. ... канд. техн. наук. Азнакаево, 1999. 155 с.

5. Технология фокусированного акустического воздействия. URL: <https://enegro.net/фокусированное-акустическое-воздейс/> (дата обращения: 01.11.2025).

6. Муллағалиева Л. Ф., Баймухаметов С. К., Портнов В. С., Юров В. М., Мадишева Р. К. Метод использования акустического метода для обнаружения зон с повышенной газоотдачей // *Международ. журн. приклад. и фундаментал. исслед.* 2022. № 9. С. 40–46.

7. Колесниченко Е. А., Артемьев В. Б., Колесниченко И. Е. Внезапные выбросы метана: теоретические основы. М.: Гор. дело, 2013. 232 с.

8. Фельдман Э. П., Василенко Т. А., Калугина Н. А. Физическая кинетика системы угольный пласт – метан: массоперенос, предвыбросные явления // *Физ.-техн. проблемы разработки полез. ископаемых.* 2014. № 3. С. 46–65.

9. Булгаков Ю. Ф., Овчаренко В. Л. Проблемы безопасной разработки выбросоопасных пластов. Донецк, 2015. 84 с.

10. Осипова И. А. Подход к созданию комплексной модели исследования прогноза внезапных выбросов угля и газа // *Гор. инф.-аналит. бюлл.* 2020. № 3–1. С. 170–177.

References

1. *Na Verblyuzh'em neftyanom mestorozhdenii v Astrakhanской oblasti budut obustroeny uchastki dobychi* [Production sites will be set up at the Verblyuzhye field in the Astrakhan region]. Available at: <https://neftegaz.ru/news/oilfield/755085-na-verblyuzhem-neftyanom-mestorozhdenii-v-astrakhanskoy-oblasti-budut-obustroeny-uchastki-dobychi/> (accessed: 01.11.2025).

2. Grubov A. I. *Razrabotka i vnedrenie tekhnologij kompleksnogo akustiko-khimicheskogo i implozionnogo vozdejstviya na prizabojnyuyu zonu plasta pri osvoenii i stimulyacii skvazhin: avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Development and implementation of technologies for complex acoustic, chemical and implosion effects on the bottom-hole zone of the reservoir during the development and stimulation of wells: abstract of the dissertation ... Candidate of Technical Sciences]. Tyumen', 1999. 22 p.

3. *Akustiko-khimicheskoe vozdejstvie (AKHV). Usloviya uspehnogo primeneniya akusticheskikh metodov. Preimushchestva i nedostatki tekhnologij AKHV. Sejsmoakusticheskoe vozdejstvie (SAV). Effekty pri SAV* [Acoustic and chemical effects (ACH). Conditions for the successful application of acoustic methods. Advantages and disadvantages of AHV technologies. Seismoacoustic impact (SAV). Effects of

SAV]. Available at: <https://studfile.net/preview/7667264/page:13/> (accessed: 01.11.2025).

4. Grubov A. I. *Razrabotka i vnedrenie tekhnologij kompleksnogo akustiko-khimicheskogo i implozionnogo vozdejstviya na prizabojnyuyu zonu plasta pri osvoenii i stimulyacii skvazhin: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of technologies for complex acoustic, chemical and implosion effects on the bottom-hole zone of the reservoir during well development and stimulation: dissertations ... Candidate of Technical Sciences]. Aznakaev, 1999. 155 p.

5. *Tekhnologiya fokusirovannogo akusticheskogo vozdejstviya* [Focused acoustic impact technology/focused acoustic impact technology]. Available at: <https://enegro.net/fokusirovannoe-akusticheskoe-vozdejs/> (accessed: 01.11.2025).

6. Mullagalieva L. F., Bajmukhametov S. K., Portnov V. S., Yurov V. M., Madisheva R. K. *Metod ispol'zovaniya akusticheskogo metoda dlya obnaruzheniya zon s povyshennoj gazootdachej* [The method of using the acoustic method to detect areas with increased gas output]. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovanij*, 2022, no. 9, pp. 40–46.

7. Kolesnichenko E. A., Artem'ev V. B., Kolesnichenko I. E. *Vnezapnye vybrosy metana: teoreticheskie osnovy* [Sudden methane emissions: theoretical foundations]. Moscow, Gornoe delo Publ., 2013. 232 p.

8. Fel'dman E. P., Vasilenko T. A., Kalugina N. A. *Fizicheskaya kinetika sistemy ugol'nyj plast – metan: mas-sopereenos, predvybrosnye yavleniya* [Physical kinetics of the coal seam – methane system: mass transfer, pre-release phenomena]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2014, no. 3, pp. 46-65.

9. Bulgakov Yu. F., Ovcharenko V. L. *Problemy bezopasnoj razrabotki vybrosoopasnykh plastov* [Problems of safe development of explosive formations]. Doneck, 2015. 84 p.

10. Osipova I. A. *Podkhod k sozdaniyu kompleksnoj modeli issledovaniya prognoza vnezapnykh vybrosov uglya i gaza* [An approach to creating a comprehensive research model for predicting sudden emissions of coal and gas]. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2020, no. 3-1, pp. 170-177.

Статья поступила в редакцию 16.10.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 05.12.2025
 The article was submitted 16.10.2025; approved after reviewing 17.11.2025; accepted for publication 05.12.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Валерьевна Егорова – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений; Астраханский государственный технический университет; egorova_ev@list.ru

Elena V. Egorova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields; Astrakhan State Technical University; egorova_ev@list.ru

Виктор Владимирович Оленников – магистрант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений; Астраханский государственный технический университет; viktor2600@mail.ru

Viktor V. Olennikov – Master's Course Student of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields; Astrakhan State Technical University; viktor2600@mail.ru

