



Научная статья
УДК 622.276.4
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

О ВЫБОРЕ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА В КАЧЕСТВЕ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПЛАСТА- КОЛЛЕКТОРА ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов^{1*},
Эльдар Рамизович Гасумов²

- ¹ Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
² Азербайджанский технический университет (д. 25, пр-т Гусейна Джавида, Баку, Азербайджанская Республика)
¹ R.Gasumov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>
² e.gasumov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В статье выполнены сбор, обобщение и анализ геологических и промысловых материалов, а также рассмотрены геолого-гидрогеологические условия для подземного захоронения сточных вод, с обоснованием выбора водоносного горизонта в качестве поглощающего пласта-коллектора. Для анализа и оценки текущего контроля гидродинамических параметров поглощающего горизонта использовались данные пробных, одиночных и кустовых откачек и закачек в скважинах, принимая за расчетную схему напорного неограниченного в плане поглощающего горизонта. Исследования по определению совместимости сточных вод с пластовыми водами горизонта проводились как расчетными методами, включая физико-математическое моделирование, так и экспериментальным путем. Выполнен анализ фильтрационных параметров поглощающего пласта по результатам гидродинамических исследований.

Ключевые слова:

водоносный пласт, сточные воды, полигон, подземные захоронения, горизонт, скважина, месторождения

Для цитирования:

Гасумов Р. А., Гасумов Э. Р. О выборе водоносного горизонта в качестве поглощающего пласта-коллектора для захоронения промышленных стоков // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 149–176. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

Конфликт интересов:

один из авторов статьи — доктор технических наук, профессор Гасумов Рамиз Алиджавад-оглы является членом редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024;
Одобрена после рецензирования 30.11.2024;
Принята к публикации 15.12.2024.

2.8.4. Development and Operation of Oil and Gas Fields (Technical Sciences)

Research article

On the selection of an aquifer as an absorbing reservoir for the disposal of industrial wastewater

Ramiz A. Gasumov^{1*},
Eldar R. Gasumov²

¹ North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)

² Azerbaijan Technical University (25, Huseyn Javid Ave., Baku, Azerbaijan Republic)

¹ R.Gasumov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

² e.gasumov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>

* Corresponding author

Abstract.

The article presents the collection, generalization and analysis of geological and field data, as well as the consideration of geological and hydrogeological conditions for underground disposal of wastewater, with the justification of the choice of an aquifer as an absorbing reservoir bed. For the analysis and assessment of the current control of the hydrodynamic parameters of the absorbing reservoir, the data of test, single and cluster pumping and injection in wells were used, taking as the calculation scheme of a pressure unlimited absorbing horizon. The studies to determine the compatibility of wastewater with formation waters of the horizon were carried out both by calculation methods, including physical and mathematical modeling, and experimentally. The analysis of the filtration parameters of the absorbing reservoir was performed based on the results of hydrodynamic studies.

Keywords:

aquifer, wastewater, landfill, underground disposal, aquifer, well, deposits

For citation:

Gasumov RA, Gasumov ER. On the selection of an aquifer as an absorbing reservoir for the disposal of industrial wastewater. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(1):149-176. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

Conflict of interest:

one of the authors of article — Ramiz A. Gasumov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, is a member of Editorial Board of journal “Science. Innovations. Technologies”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

The article was submitted 30.09.2024;
approved after reviewing 30.11.2024;
accepted for publication 15.12.2024.

Введение

В процессе эксплуатации объектов добычи, хранения и транспортировки углеводородов, в том числе подземного хранилищ газа, образуются в большом количестве сточные воды, которые требуют их утилизации. Практика показывает, что ресурсы поверхностных вод, формирующиеся за счет атмосферных осадков, довольно значительны, что определяется метеорологическими характеристиками. Одним из более эффективных способов решения данной проблемы является захоронение промышленных стоков, в том числе сточных вод, в глубоких недрах земли, что отвечает соответствующим требованиям, предъявляемым к пластам-коллекторам для создания полигона захоронения.

Материалы и методы исследований

Для исследования использованы промысловые, статистические материалы, информация из открытой печати, а также отчёты производственных и научных организаций, результаты лабораторных исследований. Для проведения вычислительных экспериментов в системе «стоки – подземные воды – вмещающие породы» использовался программный вычислительный комплекс «Селектор». Для анализа и оценки текущего контроля гидродинамических параметров поглощающего горизонта использовались данные пробных, одиночных и кустовых откачек и закачек в скважинах, принимаемая за расчетную схему напорного неограниченного в плане поглощающего горизонта. Была проанализирована промыслово-геофизическая характеристика разреза турнейского яруса нижнего карбона, также по нагнетательным скважинам. Исследования по определению совместимости сточных вод с пластовыми водами турнейского горизонта проводились как расчетными методами, включая физико-математическое моделирование, так и экспериментальным путем. В аналитических исследованиях использовались пробы пластовой и сточных вод, использован алгоритм резервуарной динамики, позволяющий моделировать процессы применительно к пластовым условиям.

Результаты исследований и их обсуждение

Как известно, для размещения промышленных стоков используются различные геологические структуры, а в нашем случае для подземного захоронения сточных вод рассматривался водоносный горизонт, как наиболее отвечающий требованиям, предъявляемым к пластам-коллекторам. Изучаемый водоносный комплекс терригенных отложений нижнего карбона представлен водовмещающими породами, содержит песчаники и алевролиты тульского и бобриковского возраста, разделенные прослоями аргиллитов [1, 2]. В региональном плане тульский и бобриковский водоносные горизонты взаимосвязаны и представляют единый водоносный комплекс, по водообильности и положению статических уровней идентичны, где пластовое давление составляет 11,4–12,3 МПа. По данным гидродинамических исследований (ГДИ) проницаемость песчаников бобриковского горизонта довольно высокая, и в среднем составляет 2,0–2,4 мкм², пьезопроводность 587,5–1640 тыс. м²/сут, а минерализация пластовых вод составляет 247,3–270,3 г/дм³, содержание йода – 10,0 мг/дм³, брома – 551,0 мг/дм³.

Также водовмещающими являются трещиноватые и выщелоченные известняки турнейского яруса, развитые в основном, в зонах рифовых массивов. Из-за отсутствия водоупора на границе с девоном водоносный комплекс турнея гидродинамически связан с водоносным комплексом карбонатного девона [3]. Турнейские известняки залегают на глубинах порядка 1250–1320 м, а покрывкой над водоносным горизонтом служат плотные разности известняков и аргиллиты верхней части турнейского яруса и аргиллиты малиновского надгоризонта. При испытании турнейского водоносного горизонта в скважинах Карашурской площади (вскрыты верхние 200 м отложений разреза, где общая толщина составляет более 400 м) получены дебиты воды от 144 до 245 м³/сут, при депрессиях 0,46 и 1,18 МПа соответственно. Статический уровень пластовых вод устанавливался на глубине 194–212 м. Проницаемость водовмещающих коллекторов составляет 0,02–0,08 мкм², средняя открытая пористость 8,1–13,5 %.

Пластовая вода турнейского горизонта представлена хлоридно-натриевыми рассолами с коэффициентом метаморфизации (Na/Cl) 0,78–0,79 (табл. 1). Газонасыщенность пластовых вод – 220–

280 см³/дм³, где основным компонентом водорастворенного газа является азот – более 95 % об, а содержание метана – менее 0,5 % об., где пластовая температура составляет 26–27°C.

Отложения турнейского яруса нижнего карбона, рассматриваемые в качестве поглощающего горизонта для захоронения сточных вод на ПХГ, в литологическом отношении представлены мощной толщей карбонатных пород. По условиям образования отложения являются рифогенно-карбонатным массивом, сложенным зернистыми органогенно-обломочными известняками иногда с прослоями доломитов. Известняки плотные, массивные, мелкокристаллические, местами трещиноватые, пористые, кавернозные, неслоистые.

По результатам петрофизических исследований керна, отобранного из интервала 1331–1404 м, известковая порода на 98 % состоит из карбоната кальция, оставшиеся 2 % представлены карбонатом магния. Нижняя часть турнейского яруса представлена также известняками, а верхняя часть разреза толщиной 65 м представлена карбонатно-глинистой толщей, которая сложена аргиллитами, местами алевролитистыми, участками известковистыми с прослоями известняков, часто глинистых.

Анализ промысловых материалов показал, что турнейский водоносный горизонт имеет следующие основные геологические свойства в рамках исследуемого вопроса:

- отложения имеют повсеместное распространение в пределах района размещения и выдержаны по толщине;
- водовмещающие отложения представлены порово-кавернозными карбонатными коллекторами, емкостно-фильтрационные свойства (ФЕС) которых позволяют использовать их в качестве хранилища для размещения сточных вод;
- высокая минерализация и отсутствие ценных компонентов в промышленных концентрациях в составе пластовых вод, а также глубина залегания не позволяют использовать выбранный объект для хозяйственно-питьевого, бальнеологического либо промышленного водопользования;

Таблица 1. ИОННО-СОЛЕВОЙ СОСТАВ ПЛАСТОВЫХ ВОД ТУРНЕЙСКОГО ГОРИЗОНТА
Table 1. Ion-salt composition of formation waters of the Tournaisian horizon

Глубина отбора пробы, м	Плотность, г/см ³	Минерализация, г/дм ³	Содержание ионов (мг/дм ³ , мг-экв/дм ³ , %-экв)	
			K ⁺ +Na ⁺	Ca ⁺²
С устья	—	256,25	80104 3483 78	1314 656 15
С устья	1,171	250,3	78075 3395 78	13049 651 15
1321,5	1,164	245,6	76882 3343 78	12830 640 15
1326,5	1,175	267,34	83863 3646 78	13916 694 15
1357,5	1,162	242,18	76320 3318 79	12238 611 15

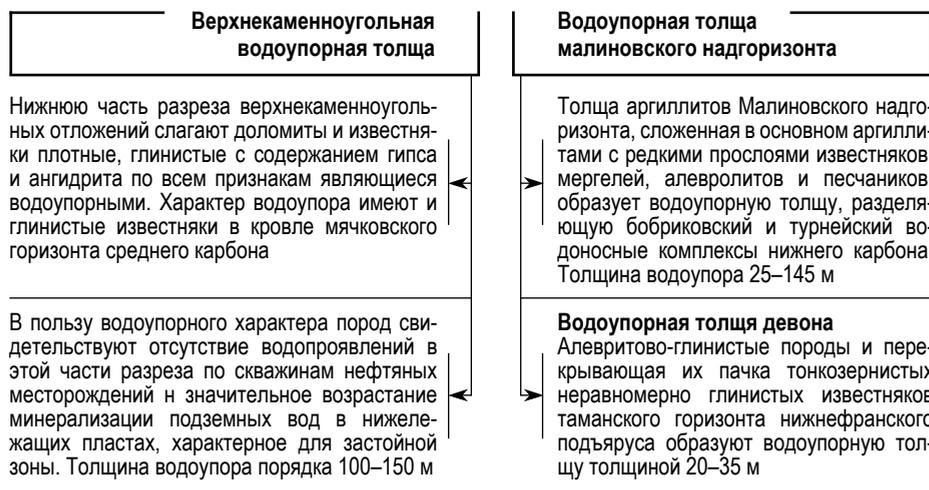


Рис. 1. Характеристика флюидоупоров турнейского водоносного горизонта.

Fig. 1. Characteristics of the Tournaisian aquifer fluid seals

					pH	Тип воды по В.А. Сулину
	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻		
	4028 331 7	158084 4459,4 100	707 15 —	79 1,3 —	6,15	хлоркальциевый
	3912 322 7	154447 4357 100	687 14 -	45 0,74 —	5,55	хлоркальциевый
	3713 305 7	151655 4277 100	533 11 —	24 — —	5,03	хлоркальциевый
	3953 325 7	164995 4653 100	600 13 —	12 0 —	4,96	хлоркальциевый
	3593 2956 6	149198 4208 100	739 15 —	98 2 —	6,81	хлоркальциевый

— поглощающий горизонт надежно изолирован в разрезе водоупорами от вышележащих водоносных и нижележащих горизонтов (рис. 1) [4].

Кровля турнейского яруса отмечается на глубине 1327 м, и в разрезе выделяются пласты-коллекторы (пласты 1–6), характеризующиеся пониженными значениями по нейтронный гамма-каротаж. Открытая пористость изменяется по разрезу в интервале 1–24 %, в среднем составляя 10%. Эффективные работающие толщины в нагнетательных скважинах составляют 59 и 26 м (табл. 2).

Как известно, контроль за компонентным составом сточных вод осуществляется в рамках мониторинга подземного захоронения сточных вод, в целом, значения минерализации стоков на рассматриваемом площади подземного хранилища газа (ПХГ) изменяются в

Таблица 2. ЭФФЕКТИВНЫЕ РАБОТАЮЩИЕ ТОЛЩИНЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ
Table 2. Effective working thicknesses in injection wells

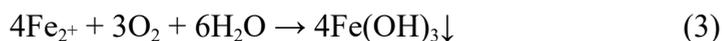
Скважина	Интервал поглощения, м	Эффективная толщина Нэф, м
1–Н	1325–1329	4,0
	1330–1338	8,0
	1343–1351	8,0
	1353–1364	11,0
	1366–1368	2,0
	1370–1376	6,0
	1381–1383	2,0
	1393–1399	6,0
	1465–1469	4,0
	1472–1476	4,0
	1482–1484	2,0
	1494–1496	2,0
Итого:		59,0
2–Н	1326–1329,5	3,5
	1357–1360	3,0
	1401–1407	6,0
	1410–1413	3,0
	1420–1423	3,0
	1432–1437	5,0
	1449,5–1452	2,5
Итого:		26,0

диапазоне 0,806–206,373 г/дм³, и зависят в основном от содержания попутных пластовых вод.

В аналитических исследованиях использовались пробы пластовой и сточных вод, и при визуальных выделениях газа выпадение осадков в процессе смешения не наблюдалось [3]. При определении совместимости жидкостей экспериментальным способом в качестве индикатора был выбран кальций (Ca), который способен образовывать труднорастворимые соли в результате следующих реакций



Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что при смешении исходных жидкостей нерастворимых осадков не образовалось. В аналогичном эксперименте в качестве индикаторных компонентов были взяты ионы Ca_{2+} , Mg_{2+} , SO_{4}^{2-} , которые потенциально способны образовывать осадок в результате смешения пластовой и сточной вод, которые проводилось при температуре 26°C (близко к пластовому), тоже показали об отсутствии процесса выпадения в осадок малорастворимых соединений, связанных с ионами-индикаторами. По истечении времени во всех отобранных смесях было зарегистрировано выпадение осадка. По результатам лабораторных исследований установлено, что пластовые воды турнейского горизонта содержат значительное количество ионов железа $[\text{Fe}_{2+}] = 481 \text{ мг/дм}^3$; $[\text{Fe}_{3+}] = 86,5 \text{ мг/дм}^3$. В присутствии окислителя (кислорода) в растворе Fe_{2+} может окисляться до Fe_{3+} с образованием осадка бурого цвета согласно следующей химической реакции



Содержание растворенного кислорода в сточной воде составило порядка $8,2 \text{ мг/дм}^3$, а фактором, определяющим возможность выпадения осадка из раствора, является рН среды и его значения в пробах стоков в изучаемый период изменялись в диапазоне $6,3\text{--}6,9$, т. е. стоки имели слабоокислую среду, поэтому в ходе выполненных экспериментальных исследований образования нерастворимых осадков не происходило. Закачка сточных вод сопровождается созданием «буферной массы» между пластовой и сточной водой, не сопровождается выпадением в осадок гидроксида железа и не оказывает влияния на приемистость нагнетательной скважины, так как отсутствует контакт указанных растворов в фильтровой зоне нагнетательных скважин (благодаря разделению жидкостей) [7].

Результаты исследований по совместимости пластовых вод со сточными свидетельствуют о том, что образования нерастворимых осадков, за исключением гидроксида железа, в рассматриваемом объекте не происходит. Взаимодействие сточных вод с водорас-

творенными газами поглощающего горизонта также маловероятно вследствие низкой газонасыщенности вод и азотного состава водорастворенных газов.

Для изучения совместимости пластовой и сточной вод был применен вычислительный комплекс «Селектор», использован алгоритм резервуарной динамики, позволяющий моделировать процессы применительно к пластовым условиям [8, 9].

Проведённый физико-химический вычислительный эксперимент (аналогичный лабораторному) дал хорошей сходимости результат, и возможность применения вычислений для последующего моделирования системы «стоки – подземные воды = вмещающие породы» в пластовых условиях. Результаты вычислений свидетельствуют о том, что сточные воды нестабильны, а именно, наблюдаются процессы осадко- и газообразования, где основной причиной нестабильности является присутствие ионов железа и метанола. Содержание метанола понижается на 5,7% относительно исходного раствора, и насыщается продуктами его разложения в основном метаном и углекислым газом, что способствует выпадению доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, а также снижается pH сточных вод. Кислород, растворенный в сточных водах, оказывает меньше влияния на стабильность исследуемых растворов, чем присутствие железа и метанола.

Следующим этапом являлось проведение вычислительных экспериментов (моделирование проводилось в системе C-Vr-Ca-Cl-Mg-N-Na-S-Fe-K-H-O) по смешению стоков с пластовой водой и вмещающей породой, при термодинамических параметрах соответствующей пластовым (температура – 26 °C, давление – 15,0 Мпа, ближе к пластовому). Результаты расчёты свидетельствуют, что при добавлении стоков в пласт выпадение осадка $\text{FeO}(\text{OH})$ не происходит за счёт высокой “буферной” массы редокс-пары $\text{Fe}_{2+}/\text{Fe}_{3+}$ пластовой воды по отношению к привнесённому железу.

В моделируемой твердой фазе рассмотрены процессы растворения – кристаллизации, происходящие во вмещающих породах. Внесение стоков в пласт способствует насыщению воды углекислым газом (продуктом разложения метанола) и увеличению кислотности раствора. Эти факторы способствуют растворению

кальцита с последующей перекристаллизацией карбоната кальция в более плотную доломитную форму в соответствии со следующим уравнением



Что касается процесса возможного образования гипса, то в результате смешения стоков и пластовых вод произведение растворимости сульфата кальция не достигается и данный осадок не выпадает, вероятность выпадения сульфата кальция только снижается по мере добавления стоков.

Алгоритм расчётов физико-химического метода, разработанный для оценки совместимости стоков и пластовой воды, также был применён для иллюстрации процессов, происходящих в пласте при кислотной обработке. Обработка 16%-ной соляной кислотой призабойной зоны способствует растворению как породы пласта, так и образованных при закачке осадков, однотипных с породой вмещающего пласта. Образующийся углекислый газ в большей степени накапливается в водной фазе, поэтому во избежание процесса перекристаллизации карбоната кальция из кальцитной формы в доломитную, как было описано выше, по окончании кислотных обработок следует промывать скважину до отсутствия в ней углекислоты. Исходя из этого, были сделаны соответствующие выводы для обоснования совместимости сточных и пластовых вод (рис. 2) [8, 10, 11].

На основании проведенных аналитических и лабораторных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- в процессе смешения сточных вод с пластовой водой выпадения труднорастворимых осадков карбоната и сульфата кальция не прогнозируется;
- сточные воды необходимо подготавливать к закачке с целью снижения возможности выпадения труднорастворимых соединений железа, для чего необходимо снижать содержание растворенного кислорода до значений ≤ 5 мг/дм³.

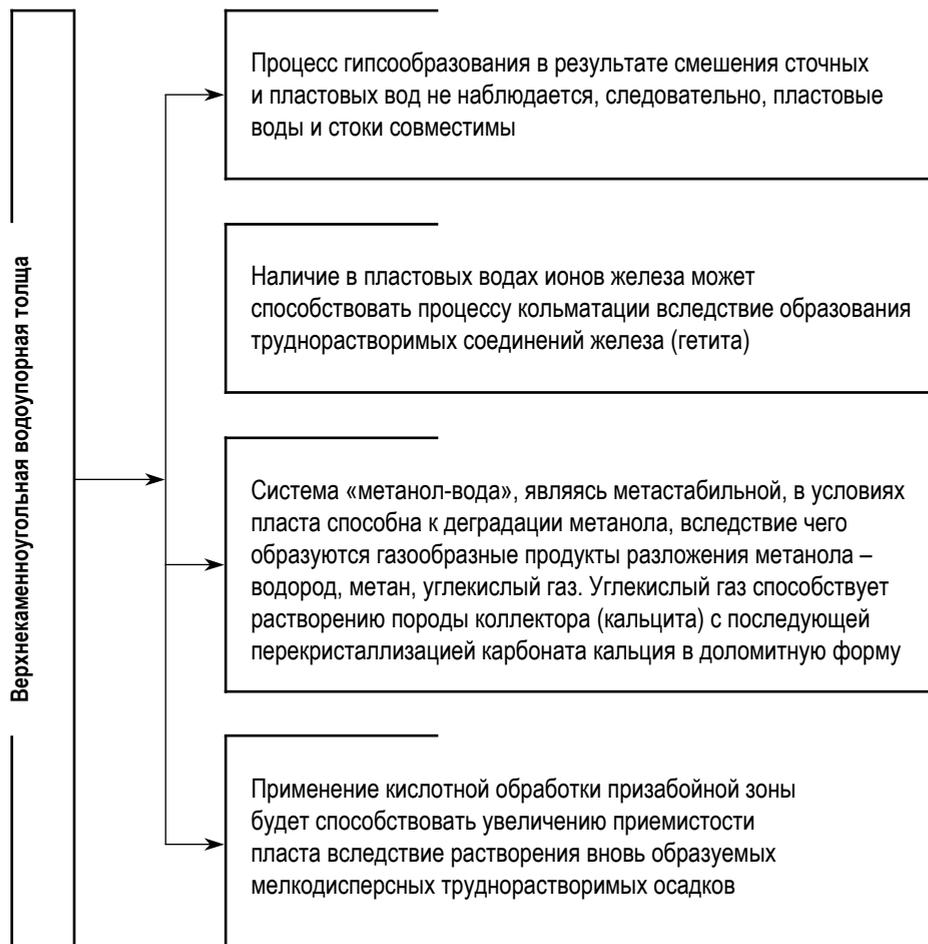


Рис. 2.

Обоснование совместимости сточных и пластовых вод.

Fig. 2. Justification of compatibility of waste and formation waters.

Прогнозные гидрогеологические расчеты для обоснования подземного захоронения сточных вод позволяют сделать выводы по гидрогеологической обстановке на объекте. Увеличение пластового давления в нагнательных скважинах сопровождается формированием конусов репрессии, а его форма вокруг полигона близка к круговой. Объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации ПХГ. Радиус распространения стоков в окружности можно определить следующим образом [11, 12]

$$R = \alpha \cdot \sqrt{\frac{V \cdot t}{\pi \cdot h_{эф} \cdot n_0 \cdot \beta}} \quad (5)$$

- где R – радиус распространения сточных вод, м;
 α – коэффициент, учитывающий неоднородность пород поглощающего горизонта (для коллекторов трещинно-порового типа, $\alpha = 3,0$) д.ед.;
 V – годовой объём сточных вод, м³;
 t – расчётный срок эксплуатации полигона ПЗСВ, лет;
 n_0 – эффективная пористость поглощающего пласта, д. ед.;
 $h_{эф}$ – эффективная мощность поглощающего пласта, м;
 β – коэффициент вытеснения стоками пластовых вод, (для коллекторов трещинно-порового типа, $\beta = 0,7$), д. ед.

Текущий радиус «пятна загрязнения» для нагнетательных скважин определяется по формуле (5), исходя из фактического объема сточных вод, если эффективную толщину принимаем как среднюю между скважинами $\approx 43,0$ м, при расчетном периоде эксплуатации полигона 25 лет, текущий контур «пятна загрязнения» на полигоне составит ≈ 133 м. Радиус распространения сточных вод в поглощающем пласте через 25-летний период эксплуатации в прогнозном объеме 8 300 м³/год с учетом ранее закачанного объема сточных вод составит ≈ 464 м. Прогнозный контур распространения сточных вод представляет собой круг и находится в границах горного отвода ПХГ. Таким образом, возможно осуществлять подземное захоронение прогнозного годового объема сточных вод в течение указанного периода, без изменения существующих границ горного отвода.

Геологическое строение и гидрогеологические условия поглощающего турнейского водоносного горизонта на участке размещения полигона ПХГ позволяют схематизировать граничные условия как напорный неограниченный в плане пласта. Режим эксплуатации полигона захоронения сточных вод – циклический, периодически изменяющийся в разрезе года, что определяется сезонами «отбора-за-

качки» газа в ПХГ, а объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации объекта.

Расчетная величина давления нагнетания на устье поглощающей скважины определяется выражением

$$P_n = P_{nl} + \Delta P + P_m - P_{cm} \quad (6)$$

Расчет репрессии вследствие закачки сточных вод произведен по двум вариантам:

Вариант 1: Для условия закачки с постоянным расходом в неограниченный пласт по уравнению Тейса-Джейкоба.

Вариант 2: Для условия закачки с изменяющимся расходом в течение периода отбора газа и последующей остановки закачки.

По варианту 1 репрессия на пласт рассчитана по формуле [6, 13]

$$\Delta P = \frac{\gamma_e \cdot Q}{400 \cdot \pi \cdot km} \ln \frac{2,25 \cdot \chi \cdot t}{r_c^2} \quad (7)$$

где ΔP_t – увеличение пластового давления вследствие закачки стоков в нагнетательной скважине, МПа;

Q – дебит закачки, м³/сут;

γ – плотность стоков, г/см³;

k_m – водопроницаемость пласта, м²/сут;

χ – пьезопроводность пласта, м²/сут;

t – продолжительность закачки, сут; r_{02} – радиус скважины, м.

Гидравлические потери давления в НКТ вычисляются по преобразованной формуле Дарси-Вейсбаха [14, 15]

$$P_m = 1,105 \cdot 10^{-13} \lambda H \beta \quad (8)$$

- где P_m – гидравлические потери на трение, МПа;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления трению ($\lambda = 0,032$);
 H – глубина спуска НКТ, м;
 Q – суточный расход сточных вод, м³;
 d – внутренний диаметр НКТ ($d = 0,1$ м), м;
 β – коэффициент, учитывающий местные сопротивления в НКТ ($\beta = 1,1$).

Давление столба стоков в скважине определяется по формуле

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h \quad (9)$$

- где ρ – плотность сточных вод, г/см³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 h – высота столба сточных вод, м.

По варианту 2 расчет определения репрессии на конечный срок эксплуатации выполнен по формуле, учитывающей цикличность эксплуатации полигона ПЗСВ [3, 6, 9]

$$\Delta P_t = \left\{ [Q_{cp} R_{tp} - (Q_{cp} - Q_{min}) R_{365} + Q_{max} R_{120}] + Q_{max} 2\mathcal{E} \right\} / 4\pi k_m \quad (10)$$

- где k_m – коэффициент водопроницаемости поглощающего горизонта, м²/сут;
 Q_{cp} – средний в разрезе года расход закачки стоков, 22,7 м³/сут;
 Q_{max} – максимальный расход закачки стоков, 250 м³/сут;
 Q_{min} – минимальный расход закачки стоков, м³/сут;
 \mathcal{E} – безразмерный показатель суммарного сопротивления скважины;
 R – безразмерный показатель гидравлического сопротивления:

$$R = \ln 2,25 \chi t / r_{02},$$

где χ – коэффициент пьезопроводности пласта;
 t – время закачки, сут;
 r_{02} – радиус скважины, м;
 t_p – расчетный срок эксплуатации полигона, сут.

Результаты увеличения пластового давления в нагнетательных скважинах и на устье скважин за 25-летний период эксплуатации полигона по вариантам представлены в таблице 3.

Кроме того, циклический характер эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод характеризуется наличием периодов простоя, в течение которых величина пластового давления снижается до начального, что подтверждается данными гидродинамического мониторинга [16, 17]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что пробуренные на полигоне нагнетательные скважины должны обеспечивать проектный объем закачки сточных вод ПХГ при допустимых давлениях нагнетания. Расчетные устьевые давления нагнетания не превышают устьевое давление гидроразрыва пласта, составляющее по данным работы порядка 20,0 МПа.

Увеличение пластового давления на полигоне будет распространяться на расстояние, которая определяется по формуле (5). Для расчета приняты усредненные гидрогеологические параметры пласта: водопроницаемость $104 \text{ м}^2/\text{сут}$, пьезопроводность $1,16 \times 10^6 \text{ м}^2/\text{сут}$. Результаты расчета распространения “конуса репрессии” на различные сроки эксплуатации полигона (табл. 4), показывает, что это сопровождается ухудшением приёмистости поглощающих горизонтов [8, 17, 18].

Снижение приёмистости может происходить вследствие заполнения порово-трещинного пространства пласта-коллектора нерастворенными нефтепродуктами или взвешенными веществами, а также вследствие образования труднорастворимых осадков в результате неудовлетворительной совместимости сточных вод с пластовыми водами и породой поглощающего горизонта [19–22].

Таблица 3. РАСЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЕЛИЧИНА ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ НА УСТЬЕ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН
Table 3. Calculation of the increase in reservoir pressure and the value of injection pressure at the mouth of injection wells

Вариант	Радиус скважины r_0 , м	Водо-проводимость $k_{п}$, м ² /сут	Пьезо-проводность Пласта, X , м ² /сут	Начальное пластовое давление, $R_{пл0}$, МПа	Расход закачки, Q , м ³ /сут	Время закачки, t , сут	Репрессия, ΔR_t , МПа	Давление нагнетания, R_n , МПа	Пластовое давление, $R_{пл}$, МПа
1	0,057	101,1	1,027·106	15,40	250	33	0,050	0,47	15,48
						65	0,013	0,40	15,80
					22,7	365	0,002	0,39	15,40
						1825	0,002	0,39	15,40
						3650	0,002	0,39	15,40
						5475	0,002	0,39	15,40
						7300	0,002	0,39	15,40
						9125	0,002	0,39	15,40
2	0,057	101,1	1,027·106	15,40		365	0,22	0,64	15,62
						1825	0,22	0,64	15,62
						3650	0,22	0,64	15,62
						5475	0,22	0,64	15,62
						7300	0,22	0,64	15,62
						9125	0,22	0,64	15,62

Таблица 3. ОКОНЧАНИЕ

Вариант	Радиус скважины $r_{об}$, м	Водо-проводимость $k_{п}$, м ² /сут	Пьезо-проводность Пласта, χ , м ² /сут	Начальное пластовое давление, $P_{пл0}$, МПа	Расход закачки, Q , м ³ /сут	Время закачки, t , сут	Репрессия, ΔP_t , МПа	Давление нагнетания, P_n , МПа	Пластовое давление, $P_{пл}$, МПа
1	0,073	107,2	1,285·106	14,50	250	33	0,045	-0,03	14,57
					65	120	0,009	-0,09	14,51
					22,7	365	0,004	-0,10	14,50
					1825	0,005	-0,10	14,50	
					3650	0,005	-0,10	14,50	
					5475	0,005	-0,10	14,50	
					7300	0,005	-0,10	14,50	
					9125	0,005	-0,10	14,50	
2	0,073	107,2	1,285·106	14,50	365	0,09	0,68	14,59	
					1825	0,09	0,67	14,59	
					3650	0,09	0,67	14,59	
					5475	0,09	0,67	14,59	
					7300	0,09	0,67	14,59	
					9125	0,09	0,67	14,59	

Таблица 4. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕПРЕССИИ В ПОГЛОЩАЮЩЕМ ПЛАСТЕ
Table 4. Distribution of repression in the absorbing layer

Расход закачки, Q, м ³ /сут	Время закачки, t, сут	Распространение репрессии, м
250	33	7000
65	120	6000
22,7	365	1000
22,7	1825	3000
22,7	3650	4000
22,7	9125	6000

Таблица 5. ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В СТОЧНЫХ ВОДАХ
Table 5. Permissible concentrations of pollutants in wastewater

Компонент	Единица изме- рения	Допустимое содержание в сточных водах		
		Межотраслевые нормы	Отраслевые нормы	Принятые для условий полигона ПЗСВ
Нефтепродукты (эмульгированные)	мг/дм ³	15	150	15
Взвешенные вещества	мг/дм ³	15	300	20
Железо окисное	мг/дм ³	3	3	3
Растворенный кислород	мг/дм ³	0,5	5	5
Сероводород	мг/дм ³	отсутствие	15	15
Метанол	г/дм ³	–	40	40
ДЭГ	г/дм ³	–	4	4

Размеры пор поглощающего пласта составляют 10–60 мкм, для беспрепятственного заполнения пласта стоками необходимо, чтобы размер механических примесей не превышал 1,6 мкм. Согласно для порово-трещинного типа коллектора при проницаемости поровой среды матрицы породы до 0,35 мкм² определены нормы качества сточных вод по содержанию в них мехпримесей – до 15 мг/дм³; нефтепродуктов – до 15 мг/дм³ (табл. 5).

При закачке в пласт кислотного раствора при давлениях нагнетания меньших, чем давление гидроразрыва, происходит растворение как непосредственно карбонатного материала слагающего скелет пласта-коллектора, так и труднорастворимых соединений, кольматирующих порово-трещинное пространство. В результате воздействия в призабойной зоне пласта происходит восстановление проницаемости, в некоторых случаях превышая ее первоначальное значение [23–25].

Очевидно, что с увеличением объемов закачки увеличится и объем поступающих в скважину в составе сточных вод взвешенных веществ и нефтепродуктов, что подразумевает более частое проведения работ по восстановлению приемистости. Однако при условии соблюдения требований по подготовке сточных вод к закачке, процесс кольматации за счет увеличения объемов сточных вод, подлежащих захоронению, существенно не скажется на приемистости скважины.

Для предотвращения возможного негативного воздействия полигона захоронения сточных вод на окружающую природную среду предусматривается создание санитарно-защитной зоны. Для нагнетательных скважин эта зона должна состоять из 2-х поясов: первый пояс устанавливается с радиусом 25–30 м от скважины, граница второго пояса проходит по контуру прогнозного ареала распространения сточных вод в поглощающем пласте на проектный срок эксплуатации.

Подземное захоронение сточных вод сопровождается созданием техногенной нагрузки на поглощающий горизонт, в котором нарушается естественное гидродинамическое состояние водонапорной системы. Основные мероприятия в санитарно-защитной зоне полигонов закачки стоков должны быть направлены на ограничение использования недр.

Заключение

Рассмотренные особенности геологического строения и гидрогеологических условий участка недр позволяют сделать вывод о возможности дальнейшего использования турнейских отложений для подземного захоронения сточных вод, поскольку отложения имеют повсеместное распространение, выдержаны по толщине и не выходят на поверхность перекрываются надежным флюидоупором.

Фильтрационно-емкостные свойства пласта-коллектора, представленного высокопроницаемыми карбонатными породами, позволяют осуществлять расчетный контур распространения сточных вод, и позволили установить, что это находится в установленных границах горного отвода подземного хранилища. Выполненные расчеты репрессии на пласт свидетельствуют о возможности закачки сточных вод с устьевыми давлениями нагнетания, не превышающими максимально допустимые.

Исследование показало, что основные изменения гидрогеологической обстановки состоит в том, что на участке подземного захоронения в пласт-коллектор внедряется определенный объем сточных вод, которые вытесняют пластовые воды, частично смешиваясь с ними. При этом в подавляющем большинстве случаев характер миграции стоков в пласте радиальный как от отдельных нагнетательных скважин, так и от полигонов захоронения в целом, форма конуса репрессии вокруг полигона также близка к круговой. Объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации ПХГ.

Список источников

1. Севастьянов О. М., Захарова Е. Е. Подземное захоронение жидких производственных отходов нефтегазовой отрасли России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/7/10_2011.pdf (дата обращения: 21.08.2024).
2. Бешенцев В. А. Захоронение сточных вод в глубокие водоносные горизонты // Научный лидер. 2021. № 9 (11). С. 3–9. URL: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stochnikh-vod-v-glubokie-vodonosn> (дата обращения: 21.08.2024).

3. Гарайшин А. С., Рубан Г. Н. Основные критерии выбора пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Карашукского подземного хранилища газа // Георесурсы. 2010. № 4 (36). С. 26–29.
4. Парфенова Т. М. Геохимия серы и сернистых соединений куонамского комплекса нижнего и среднего кембрия (восток Сибирской платформы) // Сериальное издание: Георесурсы. 2017. Вып. 1. Т. 19. С. 45–51.
5. Гасумов Э. Р., Гасумов Р. А. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 2. С. 7–28.
6. Gasumov R. A., Gasumov E. R., Minchenko Yu. S. Features of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate fields // Notes of the Mining Institute. 2020. Vol. 244. P. 418–427. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
7. Талеев А. Е., Савенок О. В. Анализ геолого-промысловой информации Восточно-Ламбейшорского месторождения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. № 2. С. 216–225.
8. Завалей В. А., Жумадилов Н. И. Оценка совместимости промышленных сточных вод с пластовыми водами и горными породами на Карачаганакском месторождении // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XIV Международной конференции. 2015. С. 251–253.
9. Лазутин Н. К., Бешенцев В. А. Гидрогеологические условия захоронения сточных вод на территории Вынгапуровского газового промысла Ямало-Ненетского нефтегазодобывающего региона // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 3. С. 20–25.
10. Сизикова Г. Г. Оценка воздействия на окружающую среду и мониторинг подземного захоронения сточных вод (на примере Сандибинского месторождения ЯНАО) // Нефтепромысловое дело. 2009. № 4. С. 50–54.
11. Gasumov R. A. et al. Creation of a three-dimensional hydrodynamic model of control horizons to study the system for monitoring the tightness of an underground gas storage facility // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Vol. 333. No. 6. P. 86–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>
12. Семенов Т. В. Проблемы совместимости пластовых и за-

- качиваемых вод на нефтепромыслах Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 4. С. 34–37.
13. Соколов А. Ф., Монахова О. М., Алеманов А. Е. Экспериментальная оценка коэффициентов вытеснения пластовых вод и приемистости пластов-приемников при закачке в глубоководные водоносные пласты жидких отходов различного состава при добыче и подземном хранении газа // Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. С. 146–162.
 14. Kanbetov A. Sh., Kulbatyrov D. K., Abilgazieva A. A., Shakhmanova A. K. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field // SOCAR Proceedings. 2023. No. 4. P. 156–161. <https://doi.org/10.5510/OGP20230400929>
 15. Kvitsand H. M. L.; Myrmel M.; Fiksdal L.; Osterhus S.W. Evaluation of bank filtration as a pretreatment method for the provision of hygienically safe drinking water in Norway: Results from monitoring at two full-scale sites // Hydrogeology Journal. 2017. Vol. 25. P. 1257–1269.
 16. Севастьянов О. М., Захарова Е. Е. Геолого-техническое обоснование подземного захоронения промстоков Южно-Субботинского нефтяного месторождения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 6. С. 26–32.
 17. Гарайшин А. С., Кантюков Р. Р. Выбор пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Арбузовского ПХГ // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 1. С. 82–86.
 18. Leusheva E., Morenov V., Tabatabaee Moradi S. Effect of carbonate additives on dynamic filtration index of drilling mud // International Journal of Engineering. 2020. Vol. 33. No. 5. P. 934–939.
 19. Page D., Bekele E., Vanderzalm J., Sidhu J. Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management // Water. 2018. Vol. 10. No. 239. 16 p. <https://doi.org/10.3390/w10030239>
 20. Jones R. et al. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 172. Article No. 112717. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>.

21. Инякина Е. И., Левитина Е. Е., Рябикова К. О., Инякин В. В. Исследование пластового флюида при разработке месторождений на шельфе Карского моря // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 1. С. 155–174. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2023.1.8>.
22. Morillas-Espana A. and others. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges // Chemosphere. 2022. Vol. 291. Part 3. Article No. 132968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>
23. Costa C. and others. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review // Marine Pollution Bulletin. 2023. Vol. 194. Part A. Article No. 115342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
24. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 362–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
25. Соколов А. Ф., Монахова О. М. Исследование методами физического моделирования геохимических изменений в глубоководных водоносных пластах при закачке в них жидких отходов // Научно-технический сборник: Вести газовой науки. 2011. № 2 (7). С. 15–26.

References

1. Sevastyanov OM, Zakharova EE. Subsurface disposal of liquid industrial wastes of the oil and gas industry of Russia. Neftegasovaâ geologiâ. Teoriâ i praktika. 2011;6(1). (In Russ.). Available from: http://www.ngtp.ru/rub/7/10_2011.pdf [Accessed 21 August 2024].
2. Beshentsev VA. Disposal of waste water in deep water horizons. Nauchnyi lider = Scientific leader. 2021;9(11):2-9. Available from: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stokhnikh-vod-v-glubokie-vodonosn> [Accessed 21 August 2024].
3. Garayshin AS, Ruban GN. Main criteria for selecting an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Karashuk underground gas storage facility. Georesursy = Georesources. 2010;4(36):26-29. (In Russ.).
4. Parfenova TM. Geochemistry of sulfur and sulfur compounds of the Kuonamsky complex of the Lower and Middle Cambrian

- (east of the Siberian platform). Serial publication: Georesources. 2017;(1)19:45-51. (In Russ.).
5. Gasumov ER, Gasumov RA. Specifics of Digital Filtering Modeling for Productive Deposits (by example of the Koshekhablskoye field). Science. Innovations. Technologies. 2021;(2):7-28. (In Russ.).
 6. Gasumov RA, Gasumov ER, Minchenko YuS. Features of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate fields. Notes of the Mining Institute. 2020;(244):418-427. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
 7. Taleev AE, Savenok OV. Analysis of geological and field information of the Vostochno-Lambeysorskoye field. Science. Engineering. Technologies (polytechnical bulletin). 2021;(2):216-225. (In Russ.).
 8. Zavalei VA, Zhumadilov NI. Assessment of the compatibility of industrial wastewater with formation waters and rocks at the Karachaganak field. Resource-reproducing, low-waste and environmental technologies for subsoil development. Proceedings of the XIV International Conference. 2015;251-253. (In Russ.).
 9. Lazutin NK, Beshentsev VA. Hydrogeological conditions of wastewater disposal on the territory of the Vyngapurovsky gas field of the Yamalo-Nenets oil and gas producing region. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = News of higher educational institutions. Oil and gas. 2017;(3):20-25. (In Russ.).
 10. Sizikova GG. Environmental impact assessment and monitoring of underground wastewater disposal (on the example of the Sandibinsky field of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug). Neftpromyslovoe delo = Oilfield Business. 2009;(4):50-54. (In Russ.).
 11. Gasumov RA et al. Creation of a three-dimensional hydrodynamic model of control horizons to study the system for monitoring the tightness of an underground gas storage facility. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022;333(6):86-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>
 12. Semenov TV. Problems of compatibility of formation and injected waters in the oil fields of Western Siberia. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = News of higher educational institutions. Oil and gas. 2017;(4):34-37. (In Russ.).

13. Sokolov AF, Monakhova OM, Alemanov AE. Experimental assessment of the displacement coefficients of formation waters and the injectivity of receiver formations when injecting liquid waste of various compositions into deep-lying aquifers during gas production and underground storage. In Current issues in the study of reservoir systems of hydrocarbon deposits: collection of scientific articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ; 2013. P. 146-162. (In Russ.).
14. Kanbetov ASH et al. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field. SOCAR Proceedings. 2023;(4):156-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20230400929>
15. Kvitsand HML and others. Evaluation of bank filtration as a pretreatment method for the provision of hygienically safe drinking water in Norway: Results from monitoring at two full-scale sites. Hydrogeology Journal. 2017;25:1257-1269.
16. Sevastyanov OM, Zakharova EE. Geological and technical substantiation of underground disposal of industrial wastewater from the Yuzhno-Subbotinskoye oil field. Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse = Environmental Protection in the Oil and Gas Complex. 2006;(6):26-32. (In Russ.).
17. Garayshin AS, Kantyukov RR. Selection Formation-Accumulator for Industrial Waste Disposal of Arbuzovsky Underground Gas Storage Facility. Georesursy = Georesources. 2017;19(1):82-86. (In Russ.).
18. Leusheva E, Morenov V, Tabatabaee MS. Effect of carbonate additives on dynamic filtration index of drilling mud. International Journal of Engineering. 2020;33(5):934-939. (In Russ.).
19. Page D, Bekele E, Vanderzalm J, Sidhu J. Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management. Water. 2018;10(239):16. <https://doi.org/10.3390/w10030239>.
20. Jones R, Wakeford M, Randall LC, Miller K, Tonin H. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone. Marine Pollution Bulletin. 2021;172:112717. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>
21. Inyakina EI et al. Investigation of Formation Fluid During the Development of Fields on the Kara Sea Shelf. Science. Innovations. Technologies. 2023;(1):155-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2023.1.8>.

22. Morillas-Espana A and others. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges Chemosphere. 2022;(291)3:132968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>
23. Costa C and others. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review. Marine Pollution Bulletin. 2023;(194) A:115342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
24. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. Waste Management. 2022;(139):362-380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
25. Sokolov AF, Monakhova OM. Study of geochemical changes in deep-lying aquifers during injection of liquid waste into them by physical modeling methods. Scientific and technical collection: News of gas science. 2011;2(7):15-26. (In Russ.).

Информация об авторах

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов – доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой базовой кафедры проектирования объектов нефтегазовой сферы Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 6507302404

Эльдар Рамизович Гасумов – кандидат экономических наук, доцент, докторант, Азербайджанский технический университет, Scopus ID: 57217090200

Вклад авторов

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Эльдар Рамизович Гасумов. Подготовка и редактирование текста, рисунки – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научно дизайне.

Information about the authors

Ramiz A. Gasumov – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Department of Basic Department of Design of Oil and Gas Facilities of the Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 6507302404

Eldar R. Gasumov – Cand. Sci. (Econ), Associate Professor, Doctoral student, Azerbaijan Technical University, Scopus ID: 57217090200

Contribution of the authors

Ramiz A. Gasumov. Carrying out the research; collection, interpretation and analysis of the data obtained. Approval of the final version – acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Eldar R. Gasumov. Preparation and editing of text, drawings; drafting the manuscript and forming its final version, participation in scientific design.