

УДК 504:622.691.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726

Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Обзорная статья

Влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта

Р.А. Гасумов^{1✉}, Э.Р. Гасумов^{2,3}

¹Северо-Кавказский Федеральный Университет, Россия, г. Ставрополь

²Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, г. Баку

³Азербайджанский технический университет, Азербайджан, г. Баку

✉R.Gasumov@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Обоснование возможности промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод, образующихся в процессе производственной деятельности, с целью утилизации промышленных стоков должно способствовать выбору способа утилизации промышленных стоков, обеспечивать экологическую безопасность и предотвратить загрязнение земной поверхности, открытых водоёмов и пресных подземных вод. Для чего необходима оценка структурно-тектонических и гидрогеологических условий полигона с точки зрения использования его для целей подземного захоронения сточных вод, определение гидродинамических параметров по данным пробной закачки сточных вод и выполнение прогнозных гидрогеологических расчетов. Это позволит разработать рекомендации по дальнейшей эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод с использованием объективной информации о процессах, происходящих в пласте-коллекторе при нагнетании отходов, о состоянии геологической среды и инженерных сооружений при закачке промышленных сточных вод. Вопросы экологической безопасности, эффективности эксплуатации объектов и прогнозирования возможных последствий таких процессов требуют изучения влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта, которая связана с необходимостью обоснования выбора пластов для захоронения отходов, влияния закачки на приёмистость нагнетательных скважин, на пластовое давление и на фильтрационно-ёмкостные свойства пород. **Цель.** Комплексная оценка происходящих в пласте-коллекторе гидродинамических процессов при закачке (нагнетании) промышленных сточных вод, их воздействия на геологическую среду (что приводит к изменению её структуры), инженерных сооружений и экологической безопасности эксплуатации полигона подземного захоронения промышленных жидких отходов. **Методы.** Сбор и обобщение промышленных материалов по изучаемому району. Для изучения закачки сточных вод использовались промышленные материалы поглощающих скважин, при анализе – фактические данные опытно-промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод и результатов гидрогеологических исследований. Оценка гидродинамических параметров проводилась с использованием результатов пробной закачки. **Результаты и выводы.** Исследованы сводноносный комплекс для размещения (захоронения) промышленных жидких отходов в геологическом разрезе участка недр. Проведена комплексная оценка влияния закачки промышленных отходов – отложений альбской толщи нижнемеловых отложений – на гидродинамические условия принимающего горизонта. Определены приёмистость поглощающих скважин, их средние значения для различных видов закачки, допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, содержание механических примесей и нефти, закачиваемой в принимающий горизонт. Определены радиусы распространения протоканалов на конец расчетного периода эксплуатации полигона с учетом уже закачанного объема и сноса «пятен загрязнения» под естественным напором пластовых вод, прогнозный радиус «пятна загрязнения» при эксплуатации полигона. Предложена геологическая модель отклонений от проектных показателей при эксплуатации объекта, рассмотрены варианты, при которых протоканалы могут выйти за пределы горного отвода.

Ключевые слова: промышленные стоки, сточные воды, подземное захоронение, альбский ярус нижнего мела, расход, давление, приёмистость скважины

Для цитирования: Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р. Влияния закачки промышленных жидких отходов на гидродинамические условия принимающего горизонта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 5. – С. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726

UDC 504:622.691.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726

Review article

Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon

R.A. Gasumov^{1✉}, E.R. Gasumov^{2, 3}

¹ North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

² Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

³ Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

✉ R.Gasumov@yandex.ru

Abstract. Relevance. Justification of the possibility of industrial operation of the landfill of underground disposal of wastewater generated in industrial activity for disposal of industrial effluents should facilitate the choice of the method of disposal of industrial effluents, ensure environmental safety and prevent pollution of the earth's surface, open water bodies and fresh groundwater. For this purpose, it is necessary to assess the structural-tectonic and hydrogeological conditions of the landfill from the point of view of its use for underground disposal of wastewater, determine the hydrodynamic parameters according to the test injection of wastewater and perform predictive hydrogeological calculations. This will allow developing recommendations for further operation of the landfill of underground disposal of wastewater, using objective information on the processes occurring in the reservoir during waste injection, on the state of the geological environment and engineering structures during the injection of industrial wastewater. The issues of environmental safety, the efficiency of operation of facilities and forecasting the possible consequences of such processes require the studying of the impact of industrial liquid waste injection on the hydrodynamic conditions of the receiving horizon. This is associated with the need to justify the choice of layers for waste disposal, the injection impact on the intake capacity of injection wells, on reservoir pressure and on the filtration-capacitive properties of rocks. **Aim.** Comprehensive assessment of the hydrodynamic processes occurring in the reservoir during the injection of industrial wastewater, their impact on the geological environment (which leads to a change in its structure), engineering structures and the environmental safety of the operation of an underground disposal site for industrial liquid waste. **Methods.** Collection and synthesis of fishing materials for the study area. To study wastewater injection, field materials from absorption wells were used, and the analysis included actual data from the pilot operation of an underground wastewater disposal site and the results of hydrogeological studies. Hydrodynamic parameters were assessed using test injection results. **Results and conclusions.** The authors have studied a water-bearing complex for the placement (disposal) of industrial liquid waste in the geological section of the subsurface area. They carried out a comprehensive assessment of the industrial waste injection effect on the hydrodynamic conditions of the receiving horizon – deposits of the Albian sequence of Lower Cretaceous deposits. The injectivity of absorption wells, their average values for various types of injection, permissible concentrations of pollutants in wastewater, content of mechanical impurities and oil injected into the productive formation were determined. The radii of distribution of industrial wastewater at the end of the estimated period of operation of the landfill were determined, taking into account the already pumped volume and the removal of “pollution spots” under the natural pressure of formation waters, and the predicted radius of the “pollution spot” during operation of the landfill. The authors proposed a geological model of deviations from design indicators during the operation of the facility, and considered the options in which industrial wastewater can go beyond the boundaries of the mining allotment.

Keywords: industrial wastewater, wastewater, underground burial, Albian stage of the Lower Cretaceous, flow rate, pressure, well infectivity

For citation: Gasumov R.A., Gasumov E.R. Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 5, pp. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2025/5/4726

Введение

Подземное захоронение промышленных жидких отходов (ПЗПЖО) осуществляется только на частично действующих и недействующих подземных резервуарах (структурах), отвечающих определенным техническим и геологическим критериям. Захоронение промышленных отходов в глубокие горизонты может

осуществляться с учетом их совместимости с пластовыми водами и подстилающими породами, если обоснована техническая невозможность или обезвреживание жидких отходов в земле экологически и экономически нецелесообразно [1, 2].

По мере выработки основных месторождений углеводородов Юга России район из газоснабжаю-

щего постепенно становится газопотребляющим и представляет свои территории для хранения и газотранспортировки природного газа в Кавказский регион. В качестве ёмкостей для ПЗПЖО можно использовать пласт-коллектор, соответствующий определенным техническим и геологическим требованиям, предъявляемым при создании полигона. Исследуемый объект для подземного захоронения промышленных стоков расположен на территории истощенного газоконденсатного месторождения (ГКМ), в отложениях II+III пластов альбского яруса нижнего мела, залегающих на глубинах 1300–1400 м. В структурном положении II и III пластов альбского яруса наблюдается увеличение толщины пластов-коллекторов от свода складки к ее южному крылу.

Объекты и методика исследования

Объектом исследования являются песчаные пласты альбского яруса в пределах горного отвода полигона ПЗПЖО и сточные воды, образующиеся при эксплуатации объектов добычи и хранения углеводородов. Выполнение прогнозных гидрогеологических расчётов с использованием промысловых данных позволяет получить объективную информацию о процессах, происходящих в пласте-коллекторе при нагнетании жидких отходов в подземном природном резервуаре для длительного времени размещения. Использование фактических данных опытно-промышленной эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод в истощённом газовом месторождении и результатов гидрогеологических исследований позволяют оценить состояние горизонта закачки по толщине, простирацию и литологическому составу, а также состояние коллекторских свойств пласта, используемых для размещения сточных вод. В качестве поглощающих рассматриваются нагнетательные скважины № 1Ab, 2Ab фактическими объёмами закачки до 600 м³ в месяц, средняя приёмистости скважин 101,4–105,8 м³/сут·МПа. Водонасыщенный комплекс нижнего мела входит в водоносную систему, состоящую из комплекса водоносных горизонтов, залегающих на дислоцированном основании складчатого фундамента.

Проведённый анализ геофизического материала по скважинам, пробуренным в пределах площади, позволил установить наличие выдержанных по площади глинистых разделов между Ia+I и II+III пластами альбского яруса нижнего мела, куда ведётся закачка сточных вод. Этот глинистый раздел, хорошо прослеживающийся по всей площади, является надёжной крышкой (обеспечивающая герметичность), толщина которой изменяется от 2,8 до 9,4 м (крышка обладает высокими флюидоупорными свойствами).

В рамках проводимых исследований изучены приёмистости нагнетательных скважин, результаты которых позволили оценить потенциал каждого объекта для длительного периода эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод (ПЗСВ).

Поскольку ПЗСВ расположен на базе истощенного газоконденсатного месторождения, о продуктивных пластах геологического разреза и непосредственно об объекте подземного захоронения сточных вод имеется довольно подробная геологическая информация, которая была использована при проведении исследований в рамках данной работы.

Результаты исследования и их обсуждение

Песчаные пласты альбского яруса расположены в пределах горного отвода ПЗСВ, образующихся при эксплуатации подземного геологического резервуара, предназначенного для хранения природного газа. Количество сточных вод в подземном хранилище характеризуется непостоянством во времени, зависит от сезона и определяется цикличностью периодов закачки–отбора газа. Основной объём сточных вод приходится на производственные сточные воды, образующиеся в период отбора газа [1, 3, 4].

Для закачки промстоков используются поглощающие скважины с средней приёмистостью 101,4–105,8 м³/сут·МПа. Закачиваемые промстоки совместимы с породой и пластовой водой свиты горячего ключа по основным осадкообразователям. Годовые объёмы закачки сточных вод составляют в основном не более 3000 м³, с максимальным расходом 140 м³ в сутки. Анализ фактических данных опытно-промышленной эксплуатации полигона ПЗСВ и результатов гидрогеологических исследований показывает, что горизонт закачки выдержан по толщине, простирацию и литологическому составу и характеризуется достаточными коллекторскими свойствами для размещения промышленных стоков. Для оценки гидродинамических параметров использованы результаты пробной закачки (табл. 1).

При неустановившемся режиме давление на забое нагнетательной скважины определяется по уравнению [5]

$$\Delta p(t) = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25x}{r_{np}^2} + \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln t, \quad (1)$$

где $\Delta p(t)$ – репрессия на забое скважины по времени, МПа; Q – расход жидкости при закачке в скважину, м³/с; μ – вязкость пластовой воды, МПа·с; k – коэффициент проницаемости, м²; h – толщина пласта, м; χ – коэффициент пьезопроводности пласта, м²/с; r_{np} – приведенный радиус скважины, м; t – время с начала остановки скважины.

Таблица 1. Определение приемистости скважины
Table 1. Determination of well injectivity

Режим (при штуцере) Mode (with fitting) D=115 мм	Время, мин Time, min	Давление закачки, МПа Injection pressure, MPa	Время, мин Time, min	Объём жидкости, м³ Liquid volume, m³	Расход жидкости, м³/с Fluid consumption, m³/s
Скважина № 1Ab, режим/Well no. 1Ab, mode					
I	4	1,0	4	1,0	4,1
II	6	1,4	6	3,0	8,3
III	20	1,6	20	7,0	5,8
Итого/Total			30	11,0	6,06
Скважина № 2Ab, режим/Well no. 2Ab, mode					
I	11:17–11:22	5,0	5	1,5	5,0
II	11:35–11:46	7,0	11	1,2	1,82
III	11:46–11:56	7,5	11	1,8	2,73
IV	11:56–12:06	7,6	11	0,2	0,3
Итого/Total			38	4,7	9,85

Уравнение (1) можно переписать в виде

$$\Delta p(t) = A + i \ln t,$$

где

$$A = \frac{Q\mu}{4\pi kh} \ln \frac{2,25x}{r_{\text{пр}}^2}, \quad i = \frac{Q\mu}{4\pi kh}.$$

Или после преобразования значение i определяется как $\text{tg}\alpha$:

$$i = \frac{\Delta p_2 - \Delta p_1}{\ln t_2 - \ln t_1}.$$

Коэффициенты проницаемости (k) и пьезопроводности (χ):

$$k = \frac{0,183Q\mu}{ih}, \quad \chi = \frac{k}{\mu(m\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{с}})},$$

где μ – вязкость воды, МПа·с; $\beta_{\text{ж}} + \beta_{\text{с}}$ – соответственно коэффициенты сжимаемости воды и породы, ТПа⁻¹; m – коэффициент пористости, д. ед.

Таблица 2. Усреднённые показатели для двух режимов по скважинам
Table 2. Average indicators for two modes for wells

Скважина № Well no.	Усреднённые показатели для двух режимов Average indicators for two modes							
	i	k , мкм² µm²	K_f , м/сут m/day	χ , м²/с m²/s	m , д. ед. unit fraction	μ , МПа MPa	T , °C	M , г/дм³ g/dm³
1Ab	0,1715	0,755	0,63	3,04·10 ⁵	0,25	1,019·10 ⁻⁹	20	10
2Ab	0,213	0,246	0,21	1,0·10 ⁵				

Примечание: i – численные расчёты $i = Q\mu/4\pi kh$; k – коэффициент проницаемости; Q – расход скважины; h – толщина пласта; χ – коэффициент пьезопроводности пласта; μ – коэффициент динамической вязкости пластовой воды; M – минерализация воды; T – температура закачиваемой воды; K_f – коэффициент фильтрации.

Note: i – numerical calculations $i = Q\mu/4\pi kh$; k – permeability coefficient; Q – well flow rate; h – formation thickness; χ – coefficient of formation piezoelectric conductivity; μ – coefficient of dynamic viscosity of formation water; M – water mineralization; T – temperature of injected water; K_f – filtration coefficient.

Коэффициент фильтрации определяется из выражения

$$K_f = 0,0864k \frac{\gamma}{\mu},$$

где K_f – коэффициент фильтрации, м/сут; γ – удельный вес воды, кН/м³.

Приведенный радиус скважины принят по данным ранее выполненных работ, согласно которым при вскрытии пласта перфоратором ПКС-80 с плотностью 12 отв./п.м для скважины диаметром 168 мм он составляет 0,04 м [6].

Забойное давление рассчитывалось с учетом положения статического уровня воды в скважине и плотности воды, и его повышение на трех ступенях закачки составило соответственно: скважина № 1Ab: $\Delta p_1 = 1,17$ МПа, $\Delta p_2 = 1,40$ МПа и $\Delta p_3 = 1,60$ МПа; скважина № 2Ab: $\Delta p_1 = 0,5$ МПа, $\Delta p_2 = 0,7$ МПа, $\Delta p_3 = 0,75$ МПа и $\Delta p_4 = 0,76$ МПа. Значение коэффициента пористости принимается равным $m = 0,25$.

Коэффициент вязкости воды определен по методике [6], согласно которой он равен

$$\mu = \mu_t + a_{\mu} M,$$

где μ_t – коэффициент вязкости дистиллированной воды при заданной температуре; a_{μ} – коэффициент, учитывающий влияние минерализации (M) на вязкость воды.

При минерализации воды 10 г/дм³ и температуре закачиваемой воды $T = 20$ °С вязкость воды составляет $\mu = 1,019 \cdot 10^{-9}$ МПа·с, коэффициент пористости пород $m = 0,25$, получены результаты численных расчетов, средние для двух режимов по скважинам отражены в табл. 2.

Полученные значения гидродинамических параметров по результатам пробных одиночных закачек и по результатам гидропрослушивания практически идентичны, принимаются в качестве средних для объекта закачки и могут быть использованы для прогнозных расчетов повышения давления в пласте.

В связи с этим для прогнозных расчетов репрессии в нагнетательных скважинах принимаются параметры, полученные по результатам периодических исследований на приемистость [1, 7, 8]. На полигоне ПЗСВ выполнен комплекс работ и исследований, позволяющий сделать вывод о том, что имеющейся геолого-геофизической информации достаточно для отнесения изучаемого участка недр к категории разведанных.

Для уточнения гидродинамических параметров поглощающего пласта предлагается в процессе эксплуатации в период максимального поступления сточных вод проведение длительной закачки (2–3 суток) на нескольких режимах. Закачку в нагнетательную скважину следует проводить с регистрацией давления на забое (середина интервала перфорации), с последующим прослеживанием восстановления уровня для определения гидравлической проводимости, коэффициента проницаемости и пьезопроводности пласта. Коэффициент пьезопроводности позволяет дать количественную оценку перераспределения давлений в пласте. Рекомендуется проводить исследование на трех ступенях с увеличением расхода закачки промстоков. Нагнетание жидкости с постоянным расходом следует производить до установления квазистационарного режима фильтрации, характеризующегося стабилизацией забойного давления, после чего осуществить переход на следующую ступень увеличения расхода. По окончании нагнетания следует записать кривую восстановления давления и обрабатывать результаты исследования по стандартной методике. В процессе исследования рекомендуется одновременно проводить гидравлические испытания (изучение характеристик распространения упругого импульса/возмущения в пласте между исследуемыми скважинами), при которых регистрируется давление в наблюдательной скважине [9–11].

Стабильность эксплуатации нагнетательной скважины зависит от совместимости закачиваемых стоков с подземными водами пласта-коллектора и породой пласта, поэтому при гидрогеологическом обосновании подземного захоронения сточных вод была проведена оценка совместимости расчетным методом. Совместимость считается удовлетворительной, если при взаимодействии сточных вод с подземными водами и породами не будут возникать процессы, способствующие снижению приемистости нагнетательных скважин, а также такие явления, как выделение тепла, ядовитых газов, взрывоопасные условия и др. [1, 10].

Как известно из практики, при откачке сточных вод зона фильтрации породы заполняется сточными водами и вытесняет пластовые воды, создавая гидрохимические системы «поток – пластовые воды», «поток – пластовые воды – горные породы»,

«поток – пластовые воды», в которых происходят сложные физико-химические взаимодействия различного характера и направления. Физико-химические процессы, протекающие в пласте под воздействием закачиваемой жидкости и существенно влияющие на перенос веществ фильтрационным потоком, могут способствовать повышению проницаемости пород (растворение, выщелачивание), снижению (сорбция, седиментация, набухание глинистых минералов, рост бактерий и др.) или практически не оказывают на него никакого влияния (ионный обмен) [1, 9, 12, 13].

Изучение совместимости сточных и подземных вод – это прежде всего определение химического состава и устойчивости смеси, а также возможности изменения структуры и состава осадков. В пластовых условиях породы пласта находятся в равновесии с пластовой водой. Закачка сточных вод в полигоне ПЗПЖО во II и III пласты альбского яруса нижнего мела не вызовет существенных изменений в системе «сток–вода», поскольку в составе производственных стоков 80 % пластовых и конденсационных вод, смесь которых по генетическому типу и составляющим компонентам совпадает с показателями вод пласта-коллектора. Хозяйственно-бытовые сточные воды по своему химическому составу отличаются от пластовых, но, учитывая, что в составе стоков их объем не превысит 10 м³/сут, совместимость закачиваемых стоков будет зависеть от состава попутно-пластовых вод.

Основными компонентами, которые могут образовывать осадки сульфатных и карбонатных солей, присутствующих в сточных водах, являются соли серной и угольной кислоты. Прежде всего, возможно образование плохо растворимых сульфатных соединений (гипс, сульфалоюминат кальция); карбоната (кальцит, доломит); сульфида железа или гидроксида железа.

Для оценки вероятности выпадения сульфатных солей при смешивании жидкостей при закачке сточных вод определена степень насыщения жидкостей, смешанных с сульфатом кальция при температуре 40–50 °С, свидетельствующая о дефиците насыщения смесей и, соответственно, о малой вероятности выпадения плохо растворимых соединений. Результаты оценки совместимости стоков с пластовыми водами пласта-коллектора свидетельствуют о том, что воды совместимы при смешивании в любых соотношениях, и образование неорганических солей угольной кислоты и сульфаты кальция маловероятно. Дополнительная подготовка сточных вод необходима для снижения содержания взвешенных веществ, соединений железа и конденсата до требуемых концентраций.

В период эксплуатации полигона ПЗПЖО оценка совместимости расчетным и лабораторным (экс-

периментальным) методами проводилась в рамках контроля гидрогеологических параметров. Для обоснования совместимости попутных вод с водой на забое нагнетательной скважины и пластовыми условиями был проведен комплекс химико-аналитических исследований компонентного состава попутных вод, предполагаемых к закачке, и воды, отобранной на забое нагнетательной скважины; экспериментальные исследования на совместимость попутных вод с водой на забое нагнетательной скважины по карбонатам; расчетная оценка совместимости попутных вод с водой, отобранной на забое поглощающей скважины по сульфатам; расчеты прогнозных коэффициентов набухания пород пласта-приемника под воздействием закачиваемых вод [6, 14, 15].

Анализ результатов показывает, что для всех вариантов смешения стоков образование осадков сульфата кальция не прогнозируется при прогреве смесей до фоновой температуры пласта. Расчетный дефицит насыщения сульфатами смесей достигает 2400–4500 мг/дм³, поэтому сульфаты скорее будут растворяться, чем выпадать в осадок. Кроме того, была изучена возможность отложения осадков в виде карбонатов и рассмотрена для ряда условий, в том числе при смешении стоков с пластовой водой III и II пласта нижнемеловых отложений, при смешении стоков с водой призабойной зоны нагнетательной скважины на летние и зимние температурные условия, в том числе при прогреве смесей до пластовых температурных условий. По результатам экспериментального тестирования смесей в заданных пропорциях в течение пяти суток осадков не обнаружено, что позволило сделать отрицательный прогноз химической коагуляции коллектора осадками. Набухание глинистой составляющей пласта не прогнозируется, так как отношение суммы двухвалентных катионов к общей сумме катионов в стоке выше (11,34 %), чем в пластовой воде (8,00 %).

Анализ содержания механических коагулянтов в контрольных пробах сточных вод подтверждает низкую текущую эффективность применяемой технологии водоподготовки. Одновременное присутствие железа и сероводорода приводит к образованию вторичных осадков, влияющих на снижение поглощающей способности скважины.

Требования к подготовке сточных вод, закачиваемых в поглощающий горизонт, обусловлены необходимостью обеспечения приемистости нагнетательных скважин в течение всего периода эксплуатации. Соблюдение требований позволяет снизить величину коагуляции призабойной зоны и увеличить период безремонтной эксплуатации скважины. Подготовка сточных вод заключается в ограничении содержания определенных компонентов, входящих в состав сточных вод [16]. Допустимое

содержание компонентов определяется главным образом коллекторскими свойствами поглощающего горизонта.

Промышленные сточные воды, предназначенные для закачки в поглощающий горизонт альбского яруса нижнемеловых отложений, по своему качеству должны отвечать определенным требованиям [9, 17] (рисунок).

Содержание загрязняющих компонентов в сточных водах в зависимости от проницаемости поглощающего пласта регламентируется согласно методике разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей, предъявляются более жесткие требования к содержанию механических примесей и нефтепродуктов в сточных водах [1, 12, 18, 19] (табл. 3).

Согласно данным гранулометрического состава мехпримесей, содержащихся в сточных водах, 2 % – частицы размером больше 1 мм, 70,9 % – частицы 0,5–0,1 мм, а остальная часть – частицы размером меньше 0,1 мм. Технологическая схема должна обеспечивать подготовку прогнозного максимального суточного объема сточных вод 140 м³/сут.

Таблица 3. Допустимое содержание механических примесей и нефти в закачиваемой в продуктивный коллектор воде с целью поддержания пластового давления

Table 3. Permissible content of mechanical impurities and oil in water injected into the productive reservoir in order to maintain reservoir pressure

Проницаемость пористой среды коллектора, мкм ² Permeability of the reservoir porous medium, μm ²	Коэффициент относительной трещиноватости коллектора Coefficient of relative reservoir-scale fractures	Допустимое содержание в воде, мг/дм ³ Permissible content in water, mg/dm ³	
		Мехпримесей Mechanical impurities	Нефти Oil
<0,1 вкл.	–	<3	<5
>0,1	–	<5	<10
<0,35 вкл.	2–6,5	<15	<15
>0,35	<2	<30	<30
<0,6 вкл.	3,5–35	<40	<40
>0,6	<3,6	<50	<50

Исходя из средних значений проницаемости поглощающего пласта (0,060–0,772 мкм²), содержание механических примесей (взвешенных веществ) не должно превышать 3–50 мг/дм³ для взвешенных веществ и 5–50 мг/дм³ для нефтепродуктов [20]. Допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, поступающих в водохранилище, должны соответствовать определенным значениям [17, 18] (табл. 4).

Необходимые требования / Necessary requirements	При закачке воды в поровые коллекторы проницаемостью до 0,068 мкм ² 90% частиц должно быть не крупнее 1 мкм When pumping water into pore reservoirs with permeability up to 0.068 μm ² 90% of particles should be no larger than 1 μm
	Содержание взвешенных частиц не должно превышать 300 мг/дм ³ The content of suspended particles should not exceed 300 mg/dm ³
	Содержание нефтепродуктов (в том числе газового конденсата) не должно превышать 150 мг/дм ³ The content of petroleum products (including gas condensate) should not exceed 150 mg/dm ³
	Содержание окисного железа – не более 3 мг/дм ³ Iron oxide content – no more than 3 mg/dm ³
	рН в пределах 6,5–8,5 pH within 6.5–8.5
	При коррозионной активности воды свыше 0,2 мм/год необходимо предусматривать мероприятия по антикоррозионной защите трубопроводов и оборудования (применение ПАВ, добавка небольших количеств нефти) When the corrosive activity of water exceeds 0.2 mm/year, it is necessary to take measures for anti-corrosion protection of pipelines and equipment (use of surfactants, addition of small amounts of oil)
	В воде, нагнетаемой в поглощающий пласт, пластовые воды которого не содержат сероводород или содержат ионы железа, сероводород должен отсутствовать There should be no hydrogen sulfide in the water injected into the absorbing formation, the formation waters of which do not contain hydrogen sulfide or contain iron ions
	Набухаемость глини-коллекторов в закачиваемой воде не должна превышать ее значения в пластовой воде The swelling capacity of clay reservoirs in injected water should not exceed its value in formation water
	Сточные воды должны быть совместимы с пластовой водой и породой пласта-коллектора Wastewater must be compatible with produced water and reservoir rock

Рисунок. Необходимые требования для закачки в поглощающий горизонт альбского яруса нижнемеловых отложений
Figure. Necessary requirements for injection of Lower Cretaceous sediments into the absorbent horizon of the Albion stage

Расчёт распространения сточных вод в пласте-коллекторе производится по формуле «поршневого вытеснения» в соответствии с [7]:

$$R_{pw} = K_{hh} \sqrt{\frac{Q_{ff}}{\pi h_{ff} m v}},$$

где R_{pw} – радиус зоны распространения сточных вод, м; K_{hh} – коэффициент надежности, принимается 1,5; v – коэффициент вытеснения пластовой воды (принимается равным 0,7); h_{ff} – эффективная толщина поглощающего пласта, м; Q_{ff} – объем

сточных вод, закачанных за прошедший период, м³; m – эффективная пористость поглощающего горизонта, д. ед.

Расчетный проектный радиус распространения сточных вод определяется исходя из прогнозного годового объема закачки. Проектный срок эксплуатации принимается как максимально возможный для установленных границ горного отвода, а расчет необходимо выполнить на 20, 40, 20, 250 лет (табл. 5).

Таблица 4. Допустимые концентрации загрязняющих веществ в сточных водах

Table 4. Permissible concentrations of pollutants in wastewater

Компонент Component	Ед. изм. Unit	Допустимое содержание в сточных водах, % Permissible content in wastewater, %	
		Межот- раслевые нормы Intersector ial norms	Для усло- вий поли- гона For landfill conditions
Нефтепродукты Petroleum products	мг/дм ³ mg/dm ³	5	<150
Взвешенные вещества Suspended substances		3	<300
Железо общее/Total iron		3	<3
Растворенный кислород Dissolved oxygen		0,5	<5
Сероводород Hydrogen sulfide		–	<15
Диэтиленгликоль Diethylene glycol	г/дм ³ g/dm ³	–	<4

Таблица 5. Прогнозный радиус «пятна загрязнения» при эксплуатации полигона

Table 5. Predicted radius of the “contamination spot” during landfill operation

Скважина № Well no.	Прогнозный радиус «пятна загрязнения» через годы эксплуатации, м Forecast radius of the “pollution spot” after years of operation, m					
	Год/Year					
	20	40	20	40	200	250
	для II пласта for layer II	для III пласта for layer III	для II пласта for layer II	для III пласта for layer III	для II и III пластов for layers II and III	
1Ab	94	133	106	133	Достигнет установленных границ горного отвода Will reach the established boundaries of the mining allotment	
2Ab	78	98	96	122		

Объем закачки по пластам пропорционален эффектив-
ным толщинам пластов/Injection volume by layer is pro-
portional to the effective thickness of the layers.

Схематизацию граничных условий следует про-
изводить исходя из региональных границ распро-
странения поглощающего пласта. Анализ геолого-
гидрогеологических региональных данных и кор-
реляция разрезов показывает, что отложения альб-
ского яруса распространены по всей территории
рассматриваемого полигона-захоронения сточных
вод и за ее пределами.

Тектоническое строение района полигона захо-
ронения сточных вод характеризуется отсутствием
в его пределах тектонических нарушений, которые
могут выполнять роль непроницаемых границ при
закачке сточных вод. В связи с вышеизложенным
для расчетов пласт-коллектор схематизируется как
напорный неограниченный в плане пласт [21, 22].

Закачка сточных вод на полигоне ПЗСВ харак-
теризуется цикличностью, т. е. чередованием пери-
одов закачки и периодов простоя. Динамика давле-
ния в соответствии с указанными периодами будет
иметь циклический характер, что подтверждается
фактическими замерами давлений на полигоне.

Таблица 6. Результаты расчета давления в нагнетательных скважинах на различные сроки экс-
плуатации (плотность стоков – 1004 кг/см³,
радиус скважины – 0,084 м)

Table 6. Results of calculating pressure in injection wells
at different service life (effluent density – 1004
kg/cm³, well radius – 0.084 m)

Скв., № Well, no.	Водопроницаемость пласта, м ² /сут Formation water conductivity, m ² /day	Пьезопроводность пласта, м ² /сут Formation piezoconductivity, m ² /day	Начальное пластовое давление, МПа Initial reservoir pressure, MPa	Расход закачки, м ³ /сут Injection consumption, m ³ /day	Время закачки, сут Download time, days	Репрессия на пласт, МПа Overburden on formation, MPa	Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, MPa	Давление нагнетания, МПа Discharge pressure, MPa
1Ab	10,71	3·10 ⁵	12,81	140	10	0,22	13,03	–0,40
				11	140	0,02	12,83	–0,65
				8	730–9125	0,015	12,83	–0,655
2Ab	5,06	1·10 ⁵	12,9	140	10	0,43	13,33	–0,076
				11	140	0,04	12,94	–0,52
				8	730–9125	0,03	12,93	–0,53

Повышение давления будет происходить в период
закачки сточных вод, длительность которого состав-
ляет около 150 суток, затем, в период простоя, конус
репрессии расформируется. Расчет увеличения
пластового давления в нагнетательных скважинах и
давления на устье скважин на различные сроки экс-
плуатации полигона приведен в табл. 6.

Расчет распространения конуса репрессии в по-
глощающем пласте произведен исходя из формулы

$$\Delta P = \frac{\gamma_v Q}{400\pi k_{\phi} h} \ln \frac{2,25\chi t}{r_c^2},$$

где ΔP – повышение пластового давления, МПа;
 Q – расход закачки сточных вод, м³/сут; γ_v – плот-
ность закачиваемых сточных вод, г/см³; k_{ϕ} – водо-
проводимость пласта, м²/сут; h – мощность пласта,
м; t – продолжительность закачки стоков, сут; χ –
пьезопроводность, м²/сут; r_c – радиус скважины, м.

Как видно из приведенных данных, повышение
давления от закачки сточных вод за 40-летний пе-
риод эксплуатации полигона распространится на
расстояние до 1,5 км, что не окажет существенного

влияния на гидродинамическую обстановку поглощающего горизонта.

Максимальное избыточное давление в устье нагнетательных скважин регламентировано и не должно превышать давления гидроразрыва поглощающего пласта. Ожидаемое устьевое давление, при котором может быть достигнуто непроизвольное давление гидравлического разрыва пласта [10, 23–27]:

- для скважины 19 № 1Ab:
 - при прогнозном расходе закачки $140 \text{ м}^3/\text{сут.}$ потери на трение – $0,054 \text{ МПа}$;
 - при максимальном фактическом расходе закачки $576 \text{ м}^3/\text{сут.}$ потери на трение – $0,900 \text{ МПа}$;
- для скважины № 2 Ab:
 - при прогнозном расходе закачки $140 \text{ м}^3/\text{сут.}$ потери на трение – $0,054 \text{ МПа}$;
 - при максимальном фактическом расходе закачки $720 \text{ м}^3/\text{сут.}$ потери на трение – $1,43 \text{ МПа}$.

Следует отметить, что при эксплуатации скважин и при определениях приемистости устьевые давления не достигали расчетных величин давления непроизвольного гидравлического разрыва пласта [28–30].

Изучения процесса эксплуатации полигона ПЗПЖО свидетельствует о фактическом обеспечении прогнозной величины закачки сточных вод в годовом объеме 3000 м^3 и максимальной суточной приемистости $140 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Фактические суточные объемы закачки сточных вод не превышают прогнозных, а устьевые давления нагнетания 5 МПа . Согласно проведенным расчетам, текущие и проектные контуры распространения сточных вод в поглощающем пласте не достигают наблюдательных скважин и не выходят за пределы установленного в лицензии горного отвода. Расчетные значения давления на пласт позволяют закачивать сточные воды при устьевом давлении, не превышающем максимально допустимое.

Сточные воды совместимы с пластовой водой по основным седиментационным агентам, а изменение требований к подготовке сточных вод к за-

качке может привести к увеличению времени между мероприятиями по восстановлению приемистости нагнетательных скважин [1, 31–33]. Результаты мониторинга на полигоне ПЗСВ позволяют сделать вывод о соблюдении основных требований при эксплуатации объекта по экологической безопасности подземного захоронения сточных вод.

Заключение

Результаты проведенного исследования в истощённом месторождении позволяют сделать вывод о возможности дополнительно использовать в длительные сроки слой альбского яруса для захоронения (размещения) сточных вод, так как отложения широко распространены в районе и имеют равномерную мощность, покрыты надёжным, относительно непроницаемым для жидкостей слоем скального тела, обладают необходимыми ёмкостными фильтрующими свойствами. Установлено, что в процессе эксплуатации полигона контур распространения сточных вод в поглощающем пласте не достигает наблюдательных скважин и не выходит за пределы установленного горного отвода. Расчётные значения репрессии на пласт позволяют осуществлять закачку сточных вод с устьевыми давлениями нагнетания, не превышающими максимально допустимое давление, не провоцируя гидравлического разрыва пласта. Сточные воды совместимы с пластовой водой по основным осадкообразующим веществам. Подземный проницаемый водоносный горизонт имеет достаточную ёмкость для захоронения необходимого количества жидких промышленных отходов и изолирован от других водоносных горизонтов, используемых для водоснабжения, добычи полезных ископаемых и бальнеологических целей. Подземная прокладка сточных вод от производства является рациональным методом утилизации промышленных сточных вод, отвечающим определённым инженерно-геологическим критериям и позволяющим экономически и экологически безопасно удалять, и надёжно обезвреживать промышленные сточные воды из среды обитания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гасумов Р.А., Гасумов Э.Р., Минченко Ю.С. Особенности строительства подземных хранилищ на истощённых нефтегазоконденсатных месторождениях // Записки горного университета. – 2020. – Т. 244. – С. 418–427. DOI: 10.31897/pmi.2020.4.4
2. Вайншток П.Н., Назаров В.Д., Назаров М.В. Очистка производственных сточных вод электрохимическим методом // Экология и промышленность России. – 2013. – № 2. – С. 18–21.
3. Бешенцев В.А. К вопросу о возможности захоронения сточных вод в недра // Горные ведомости. – 2014. – № 12. – С. 30–42.
4. Использование подземных горных выработок для захоронения радиоактивных отходов 3-го и 4-го классов / Н.В. Горин, В.П. Кучинов, С.В. Усанов, А.П. Васильев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 9 – С. 128–136. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4159>.
5. Гидродинамические исследования скважин / Т.А. Деева, М.Р. Камартинов, Т.Е. Кулагина, П.В. Мангазеев, М.В. Панков. – Томск, Изд-во ТПУ, 2004. – 340 с.

6. Бешенцев В.А., Гуляева Ю.В. Состояние и перспективы глубинного захоронения сточных вод на месторождениях Ямало-Ненецкого автономного округа // *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. – 2022. – № 1. – С 12–23. DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-1-12-23>.
7. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field / A.Sh. Kanbetov, D.K. Kulbatyrov, A.A. Abilgazieva, A.K. Shakhmanova // *SOCAR Proceedings*. – 2023. – № 4. – P. 156–161. DOI: 10.5510/OGP20230400929
8. Лепокурова О.Е., Трифонов Н.С. Оценка применимости геохимических геотермометров для пластовых вод Томской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 208–218. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3878>.
9. О необходимости комплексной геоэкологической оценки техногенно нарушенных горными работами земель / В.Л. Гаврилов, Н.А. Немова, А.В. Резник, Н.С. Косарев, А.А. Колесников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 76–87. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4212>.
10. Enhancing classification and recovery of barite from waste drilling fluid by inlet particle arranging of hydrocyclone / W. Lv, J. Zhao, M. Hao, J. Liu, Y. Zhang, J. Zheng, B. Su, Y. Wang, Y. Huang // *Journal of Water Process Engineering*. – 2023. – Vol. 56. – P. 104341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104341>.
11. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone / R. Jones, M. Wakeford, L.C. Randall, K. Miller, H. Tonin // *Marine Pollution Bulletin*. – 2021. – Vol. 172. – P. 112717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>
12. Гасумов Э.Р., Гасумов Р.А., Павлюкова И.В. Влияние техногенных факторов на геотехнические системы и обеспечении экологической безопасности разработки месторождений УВ // *Территория «Нефтегаз»*. – 2016. – № 7–8. – С. 110–115.
13. Ивченко М.В., Мельников Е.А. Захоронение промышленных сточных вод на подземных хранилищах газа // *Газовая промышленность*. – 2017. – № 1 (750). – С. 112–116.
14. Казбулатова Г.М., Мичурин С.В., Карамова А.М. Геоэкологическая оценка состояния поверхностных вод Авзянского золотоносного района Республики Башкортостан // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С.139–152. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3556>.
15. Geodynamic prerequisites and reflection of signs of fluid migration in hydrogeochemical indicators of formation water in the Bukhara-Khiva region / R.A. Umurzakov, T.Kh. Shoymuratov, A.S. Ibragimov, H.F. Khudoiberdiyev // *SOCAR Proceedings*. – 2022. – № 1. – P.14–23. DOI: 10.5510/OGP20220100624.
16. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges / A. Morillas-Espana, T. Lafarga, A. Sanchez-Zurano, F.G. Acien-Fernandez, C. Gonzalez-Lopez // *Chemosphere*. – 2022. – Vol. 291. – P. 3. – 132968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>.
17. Physical and chemical characterization of drill cuttings: a review / C. Costa, C.F. Carvalho, A.S. Soares, A.C. Souza, E.F. Bastos, E.C. Guimarães, J.C. Santos, T. Carvalho, V.H. Calderari, L.S. Marinho, M.R. Marques // *Marine Pollution Bulletin*. – September 2023. – Vol. 194. – P. A. – 115342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
18. Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей. Утверждена Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 29 декабря 2020 г. № 1118. – М., 2020. – 53 с.
19. Рациональные области применения различных видов оборудования для защиты от механических примесей / А.В. Булат, С.А. Карелина, В.Н. Ивановский, М.Г. Блохина, И.С. Пятов, Л.В. Воробьева, Ю.В. Кирпичев, В.Г. Тимошенко // *Территория «Нефтегаз»*. – 2020. – № 9–10. – С. 52–63.
20. Гарайшин А.С., Кантиюков Р.Р. Выбор пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Арбузовского ПХГ // *Георесурсы*. – 2017. – № 19 (1). – С. 82–86. DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.13>.
21. Disposal of high-level nuclear waste in deep horizontal drillholes energies / R.A. Muller, S. Finsterle, J. Grimsich, R. Baltzer, E.A. Muller, J.W. Rector, J. Payer, J. Apps // *Energies*. – 2019. – № 12. – P. 20–52. DOI: 10.3390/en12112052.
22. Гарайшин А.С., Рубан Г.Н. Основные критерии выбора пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Карашурского подземного хранилища газа // *Георесурсы*. – 2010. – № 4 (36). – С. 26–29.
23. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia / G. Ilinykh, J. Fellner, N. Slius, V. Korotaev // *Sustainable Environment Research*. – 2023. – Vol. 33 (9). – P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s4234-023-00171-0>.
24. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoecological conditions of technogenic groundwater in waste disposal // *Notes of the Mining Institute*. – 2023. – Vol. 260. – P. 168–178. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.
25. Абдрахманов Р.Ф. Проблемы удаления жидких промышленных стоков в глубокие водоносные горизонты // *Геологический вестник*. – 2019. – № 1. – С. 159–165. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13>.
26. Soil Contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: a review / Y. Chernysh, V. Chubur, I. Ablicieva, P. Skvortsova, O. Yakhnenko, M. Skydanenko, L. Plyatsuk, H. Roubik // *Soil Syst*. – 2024. – Vol. 8 (2). – P. 36. DOI: 10.3390/soilsystems8020036.
27. Оценка качества подземных вод, используемых в хозяйственно-питьевых целях в Республике Дагестан / Т.О. Абдулмуталимова, О.М. Рамазанов, А.Б. Алхасов, И.М. Газалиев // *Юг России: экология, развитие*. – 2023. – № 18 (2). – С. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101>.
28. Гасумов Э.Р., Велиев В.М. Методы обеспечения экологической безопасности при разработке малых газоконденсатных месторождений // *Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития: Сборник трудов Международной научно-практической конференции*. – Ставрополь, 1–2 декабря 2020. – Ставрополь: СКФУ, 2020. – С. 402–412.
29. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations / J. Njuguna, S. Siddique, L.K. Bakah, S. Piromrat, K.A. Afoakwa, U. Ekeh-Adegbotolu, G. Oluyemi, K. Yates, A.K. Mishra, L. Moller // *Waste Management*. – 2022. – Vol. 139. – P. 362–380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>.

30. Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation / G. Armand, J. Talandier, A. Dizier, X.L. Li, S. Levasseur // Geological Society, Special Publications. – 2022. – Vol. 536. – P. 237–256. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP536-2022-98>.
31. Mehnert E., Gendron C.R., Brower R.D. Investigation of the hydraulic effects of deep-well injection of industrial wastes // Environmental Geology – Illinois State Geological Survey, 1990. – 135 p. DOI: <http://hdl.handle.net/2142/25572>.
32. Trifonov N.S., Novikov D.A., Yamskikh A.A. Hydrogeological prerequisites for industrial waste injection during the development of priority area of the Yurubcheno-Tokhomo field // Water Resources. – 2015. – Vol. 42. – № 7. – P. 909–921. DOI: 10.1134/S0097807815070131.
33. Влияние экономической эффективности проекта на выбор технологий подготовки пластовой воды, используемой для системы ППД в ООО «РН-Пурнефтегаз» / А.А. Тихонов, Г.В. Фёдоров, Р.М. Масалимов, Л.Е. Каштанова, Е.М. Валеев, М.В. Турлаков // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20. – № 4. – С. 94–100.

Информация об авторах

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой проектирования объектов нефтегазовой сферы Северо-Кавказский федеральный университет, Россия, 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1; R.Gasumov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>
Эльдар Рамизович Гасумов, кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Азербайджан, AZ1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 20; докторант, Азербайджанский технический университет, Азербайджан, AZ1148, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25. e.gasumov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>

Поступила в редакцию: 07.06.2024

Поступила после рецензирования: 20.06.2024

Принята к публикации: 02.04.2025

REFERENCES

1. Gasumov R.A., Gasumov E.R., Minchenko Yu.S. Features of the construction of underground storage facilities in depleted oil and gas condensate fields. *Notes of the Mining University*, 2020, vol. 244, pp. 418–427. (In Russ.) DOI: 10.31897/pmi.2020.4.
2. Vainshtok P.N., Nazarov V.D., Nazarov M.V. Purification of industrial wastewater using the electrochemical method. *Ecology and industry of Russia*, 2013, no. 2, pp. 18–21. (In Russ.)
3. Beshentsev V.A. On the issue of the possibility of burying wastewater in the subsoil. *Mining Vedomosti*, 2014, no. 12, pp. 30–42. (In Russ.)
4. Gorin N.V., Kuchinov V.P., Usanov S.V., Vasiliev A.P. The use of underground mine workings for the disposal of radioactive waste of the 3rd and 4th classes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 128–136. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4159>.
5. Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V., Pankov M.V. *Hydrodynamic studies of wells*. Tomsk, TPU Publ. house, 2004. 340 p. (In Russ.)
6. Beshentsev V.A., Gulyaeva Yu.V. State and prospects for deep burial of wastewater in the fields of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Bulletin of higher educational institutions. Oil and gas*, 2022, no. 1, pp. 12–23. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2022-1-12-23>.
7. 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, pp. 156–161. DOI: 10.5510/OGP20230400929.
8. Lepokurova O.E., Trifonov N.S. Assessment of the applicability of geochemical geothermometers for formation waters of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 208–218. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/12/3878>.
9. Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V., Kosarev N.S., Kolesnikov A.A. On the need for a comprehensive geo-ecological assessment of technogenically disturbed lands by mining. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 10, pp. 76–87. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/10/4212>.
10. Lv W., Zhao J., Hao M., Liu J., Zhang Y., Zheng J., Su B., Wang Y., Huang Y. Enhancing classification and recovery of barite from waste drilling fluid by inlet particle arranging of hydrocyclone. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, vol. 56, 104341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104341>.
11. Jones R., Wakeford M., Randall L.C., Miller K., Tonin H. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, vol. 172, pp. 112717. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>.
12. Gasumov E.R., Gasumov R.A., Pavlyukova I.V. The influence of technogenic factors on geotechnical systems and ensuring environmental safety of hydrocarbon deposit development. *Territory Neftegaz*, 2016, no. 7–8, pp. 110–115. (In Russ.)
13. Ivchenko M.V., Melnikov E.A. Disposal of industrial wastewater in underground gas storage facilities. *Gas industry*, 2017, no. 1 (750), pp. 112–116. (In Russ.)
14. Kazbulatova G.M., Michurin S.V., Karamova A.M. Geoecological assessment of the state of surface waters of the Avzyan gold-bearing region of the Republic of Bashkortostan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 139–152. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/8/3556>.
15. Umurzakov R.A., Shoymuratov T.Kh., Ibragimov A.S., Khudoiberdiyev H.F. Geodynamic prerequisites and reflection of signs of fluid migration in hydrogeochemical indicators of formation water in the Bukhara-Khiva region. *SOCAR Proceedings*, 2022, no. 1, pp. 14–23. DOI: 10.5510/OGP20220100624.

16. Morillas-Espana A., Lafarga T., Sanchez-Zurano A., Acien-Fernandez F.G., Gonzalez-Lopez C. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges. *Chemosphere*, 2022, vol. 291, P. 3, 132968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>.
17. Costa C., Carvalho C.F., Soares A.S., Souza A.C., Bastos E.F. Guimarães E.C., Santos J.C., Carvalho T., Calderari V.H., Marinho L.S., Marques M.R. Physical and chemical characterization of drill cuttings: a review. *Marine Pollution Bulletin*, September 2023, vol. 194, part A, 115342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>.
18. Methodologies for developing standards for permissible discharges of pollutants into water bodies for water users. *Approved by the Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated December 29, 2020*. No. 1118. Moscow, 2020. 53 p. (In Russ.).
19. Bulat A.V., Karelina S.A., Ivanovsky V.N., Blokhina M.G., Pyatov I.S., Vorobyova L.V., Kirpichev Yu.V., Timoshenko V.G. Rational areas of application of various types of equipment for protection against mechanical impurities. *Territory "Neftegaz"*, 2020, no. 9–10, pp. 52–63. (In Russ.).
20. Garaishin A.S., Kantuykov R.R. Selection of an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Arbuzovskoe underground gas storage facility. *Georesursy*, 2017, no. 19 (1), pp. 82–86. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.18599/grs.19.1.13>.
21. Muller R.A., Finsterle S., Grimsich J., Baltzer R., Muller E.A., Rector J.W., Payer J., Apps J. Disposal of high-level nuclear waste in deep horizontal drillholes energies. *Energies*, 2019, no. 12, pp. 20–52. DOI: 10.3390/en12112052.
22. Garaishin A.S., Ruban G.N. The main criteria for choosing an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Karashur underground gas storage facility. *Georesursy*, 2010, no. 4 (36), pp. 26–29. (In Russ.).
23. Ilinykh G., Fellner J., Sliusar N., Korotaev V. A life cycle assessment of drilling waste management: a case study of oil and gas condensate field in the north of western Siberia, Russia. *Sustainable Environment Research*, 2023, vol. 33:9, pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1186/s4234-023-00171-0>.
24. Semyachkov A.I., Pochechun V.A., Semyachkov K.A. Hydrogeoeological conditions of technogenic groundwater in waste disposal. *Notes of the Mining Institute*, 2023, vol. 260, pp. 168–178. DOI: 10.31897/PMI.2023.24.
25. Abdrakhmanov R.F. Problems of removing liquid industrial wastewater into deep aquifers. *Geological Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 159–165. (In Russ.) DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-1-13>.
26. Chernysh Y., Chubur V., Ablieva I., Skvortsova P., Yakhnenko O., Skydanenko M., Plyatsuk L., Roubik H. Soil contamination by heavy metals and radionuclides and related bioremediation techniques: a review. *Soil Syst.*, 2024, vol. 8 (2), no. 36. DOI: 10.3390/soilsystems8020036.
27. Abdulmutalimova T.O., Ramazanov O.M., Alkhasov A.B., Gazaliev I.M. Assessment of the quality of groundwater used for domestic and drinking purposes in the Republic of Dagestan. *South of Russia: ecology, development*, 2023, no. 18 (2), pp. 92–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-92-101>.
28. Gasumov E.R., Veliyev V.M. Methods for ensuring environmental safety when developing small gas condensate fields. *Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development. Collection of proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Stavropol, December 1–2, 2020. Stavropol, NCFU Publ., 2020. pp. 402–412. (In Russ.).
29. Njuguna J., Siddique S., Bakah L.K., Pimrat S., Afoakwa K.A., Ekeh-Adegbotolu U., Oluyemi G., Yates K., Mishra A.K., Moller L. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. *Waste Management*, 2022, vol. 139, pp. 362–380. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>.
30. Armand G., Talandier J., Dizier A., Li X.L., Levasseur S. Contribution of HADES URL to the development of the Cigéo project, the French industrial centre for geological disposal of high-level and long-lived intermediate-level radioactive waste in a deep clay formation. *Geological Society, London, Special Publications*, 2022, vol. 536, pp. 237–256. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP536-2022-98>.
31. Well Injection of Industrial Wastes. *Environmental Geology – Illinois State Geological Survey*, 1990. 135 p. DOI: <http://hdl.handle.net/2142/25572>.
32. Trifonov N.S., Novikov D.A., Yamskikh A.A., Hydrogeological Prerequisites for industrial waste injection during the development of priority area of the Yurubcheno-Tokhomo field. *Water Resources*, 2015, vol. 42, no. 7, pp. 909–921. DOI: 10.1134/S0097807815070131.
33. Tikhonov A.A., Fedorov G.V., Masalimov R.M., Kashtanova L.E., Valeev E.M., Turlakov M.V. The influence of the economic efficiency of the project on the choice of technologies for the preparation of formation water used for the pressure maintenance system at LLC "RN-Purneftegaz". *Oil and Gas Business*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 94–100. (In Russ.).

Information about the authors

Ramiz A. Gasumov, Dr. Sc., Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Design of Oil and Gas Facilities Department, North Caucasus Federal University, 1, Pushkin street, Stavropol, 355017, Russian Federation; R.Gasumov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

Eldar R. Gasumov, Cand. Sc., Associate Professor, Azerbaijan State University of Oil and Industry, 20, Azadlig vaenue, Baku, AZ1010, Azerbaijan; Doctoral Student, Azerbaijan Technical University, 25, G. Javid avenue, Baku, AZ1148, Azerbaijan; e.gasumov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>

Received: 07.06.2024

Revised: 20.06.2024

Accepted: 02.04.2025