

УДК 622.276.66:504.06

***ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТРУДНОИЗВЛЕКАЕМЫХ
ЗАПАСОВ НЕФТИ МЕТОДОМ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА***

Байрамова Г.М.

Преподаватель,

Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева

Туркменистан, г. Ашхабад

Абаева С.С.

Студент,

Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева

Туркменистан, г. Ашхабад

Гылычмырадов Г.Г.

Преподаватель,

Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева

Туркменистан, г. Ашхабад

Байгелдиев К.Д.

Студент,

Международный университет нефти и газа имени Ягшигельды Какаева

Туркменистан, г. Ашхабад

Аннотация. Статья посвящена систематизации экологических рисков, возникающих при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти методом гидравлического разрыва пласта (ГРП). Актуальность работы обусловлена расширением применения многостадийного ГРП для вовлечения в разработку низкопроницаемых коллекторов, что сопровождается ростом техногенной нагрузки на окружающую среду. Целью исследования являлся комплексный

Дневник науки | www.dnevniknauki.ru | СМИ Эл № ФС 77-68405 ISSN 2541-8327

анализ основных категорий экологических рисков данной технологии и систематизация направлений их минимизации. На основе анализа отечественной и зарубежной научно-технической литературы, нормативно-технических документов и материалов международных организаций рассмотрены риски загрязнения и истощения водных ресурсов, индуцированной сейсмичности, обращения с технологическими жидкостями, буровым шламом и попутными стоками, выбросов метана в атмосферу, а также нарушения и последующей рекультивации земель. Показано, что рост сейсмической активности при разработке ТРИЗ связан преимущественно с закачкой больших объёмов попутных стоков, а не с самой операцией ГРП, что имеет значение для организации мониторинга и регулирования. Установлено, что значительная часть экологической нагрузки формируется не только на этапе проведения гидроразрыва, но и на последующих стадиях - при обращении с отходами и рекультивации нарушенных территорий. Сделан вывод о необходимости комплексного, дифференцированного по видам рисков подхода к экологическому сопровождению проектов разработки ТРИЗ, интегрированного во все стадии освоения месторождения.

Ключевые слова: трудноизвлекаемые запасы нефти, гидравлический разрыв пласта, экологические риски, загрязнение подземных вод, индуцированная сейсмичность, выбросы метана, буровой шлам, рекультивация земель, попутные стоки, водопотребление.

ENVIRONMENTAL RISKS ASSOCIATED WITH DEVELOPING HARD-TO-RECOVER OIL RESERVES USING HYDRAULIC FRACTURING

Bayramova G.M.

Lecturer,

Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University

Turkmenistan, Ashgabat

Abayeva S.S.

Student,

Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University

Turkmenistan, Ashgabat

Gylychmyradov G.G.

Lecturer,

Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University

Turkmenistan, Ashgabat

Baygeldiyev K.D.

Student,

Yagshygeldi Kakayev International Oil and Gas University

Turkmenistan, Ashgabat

Abstract. This article focuses on systematizing the environmental risks associated with the development of hard-to-recover oil reserves using hydraulic fracturing (HF). The relevance of this work stems from the expanding use of multistage hydraulic fracturing to develop low-permeability reservoirs, a process accompanied by an increase in the anthropogenic load on the environment. The study aimed to conduct a comprehensive analysis of the main categories of environmental risks associated with this technology and to systematize approaches for their mitigation. Based on an analysis of domestic and international scientific and technical literature, regulatory documents, and materials from international organizations, the authors examine risks related to the pollution and depletion of water resources, induced seismicity, the handling of process fluids, drill cuttings, and associated wastewater, methane emissions into the atmosphere, as well as land disturbance and subsequent reclamation. It is demonstrated that the increase in seismic activity during the

development of hard-to-recover reserves is primarily linked to the injection of large volumes of associated wastewater rather than the hydraulic fracturing operation itself-a finding that has significant implications for monitoring and regulatory practices. It has been established that a significant portion of the environmental impact arises not only during the hydraulic fracturing stage but also during subsequent phases-specifically, waste management and the remediation of disturbed areas. The study concludes that there is a need for a comprehensive approach to the environmental management of projects involving hard-to-recover oil reserves-an approach that is differentiated based on risk types and integrated into all stages of field development.

Key words: ard-to-recover oil reserves, hydraulic fracturing, environmental risks, groundwater contamination, induced seismicity, methane emissions, drill cuttings, land remediation, associated wastewater, water consumption.

Истощение традиционных, легкодоступных месторождений углеводородов вынуждает нефтегазовую отрасль осваивать трудноизвлекаемые запасы (ТРИЗ) нефти, сосредоточенные в низкопроницаемых коллекторах со сложным геологическим строением. Ключевой технологией, сделавшей такую добычу экономически рентабельной, является многостадийный гидроразрыв пласта (МГРП): закачка жидкости в скважину под высоким давлением создает в породе сеть трещин, что значительно увеличивает площадь контакта между пластом и стволом скважины и, как следствие, повышает дебиты и коэффициенты извлечения нефти [1, 2]. Эта технология лежит в основе современных подходов к разработке плотных и низкопроницаемых нефтеносных пластов во всем мире [3].

Однако применение МГРП для интенсификации притока сопряжено с повышенной антропогенной нагрузкой на окружающую среду. Сложное геологическое строение коллекторов ТРИЗ требует более интенсивного

технологического вмешательства, включая бурение большего числа скважин, проведение повторных операций ГРП и использование значительных объемов технологических жидкостей. Подобные мероприятия усугубляют негативное воздействие на природные экосистемы и увеличивают экологические издержки нефтехимических и нефтяных компаний [4]. Независимо от конкретного региона добычи, всесторонний анализ сопутствующих экологических проблем приобретает особую актуальность ввиду масштабности потенциальной разработки таких активов.

В контексте освоения трудноизвлекаемых запасов, где технологическая нагрузка на пласт выше, чем при традиционной добыче, данное исследование обусловлено необходимостью систематизации разрозненных данных о механизмах воздействия гидроразрыва пласта на компоненты окружающей среды: водные ресурсы, недра, атмосферный воздух и земельные ресурсы.

Целью работы является систематизация ключевых решений, направленных на снижение экологических рисков, связанных с применением гидроразрыва пласта при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: оценка рисков, обусловленных составом и токсичностью жидкостей для ГРП и обращением с попутными пластовыми водами; анализ механизмов воздействия гидроразрыва пласта на поверхностные и подземные воды; характеристика проблемы наведенной сейсмичности, возникающей в результате закачки технологических жидкостей; рассмотрение специфических экологических издержек, связанных с разработкой сложных низкопроницаемых коллекторов; а также разработка основных стратегий снижения экологических рисков при масштабировании данной технологии для проектов освоения трудноизвлекаемых запасов. Материалы и методы исследования

Для анализа технологии гидравлического разрыва пласта (ГРП) и ее воздействия на окружающую среду в исследовании применялся комплексный

подход, основанный на данных международных организаций, аналитических и отраслевых публикациях, а также отечественной и зарубежной научно-технической литературе [5]. Обзор охватывал источники, описывающие влияние ГРП на поверхностные и подземные воды, характер наведенной сейсмичности, состав технологических жидкостей и методы обращения со сточными водами, а также особенности освоения низкопроницаемых пластов, относящихся к распространенному типу трудноизвлекаемых запасов.

На основе отобранных данных были выделены пять основных категорий экологических рисков: 1) гидрогеологические риски (загрязнение поверхностных и подземных вод); 2) геодинамические риски (наведенная сейсмичность); 3) риски, связанные с составом и обращением со сточными водами и технологическими жидкостями; 4) риски для качества атмосферного воздуха; 5) риски, обусловленные геологической сложностью пластов и масштабами разработки. В соответствии с форматом аналитического обзора, такой подход позволил провести сравнительный анализ факторов риска и существующих инструментов мониторинга (изотопные методы в гидрологии, микросейсмический мониторинг, подбор реагентов) без проведения самостоятельных полевых наблюдений.

Результаты исследования

Загрязнение поверхностных и подземных вод. Согласно результатам анализа, основными путями загрязнения водных объектов являются утечки технологических жидкостей непосредственно в процессе гидравлического разрыва пласта (ГРП) и непреднамеренные разливы из шламонакопителей, куда поступает жидкость, извлекаемая из скважины после проведения ГРП [6]. Особую опасность представляют поврежденные или заброшенные скважины, через которые жидкость для ГРП может мигрировать в соседние водоносные горизонты и загрязнять подземные воды [7]. Важным методом контроля этой угрозы является изотопная гидрология: она позволяет специалистам определять

источник выявленного загрязнения, а также подтверждать или опровергать наличие связи между конкретной скважиной и изменениями качества подземных вод с помощью таких индикаторов, как криптон-81 и изотопы аргона [8].

Наведенная сейсмическая активность. Согласно данным обзора специализированной литературы, рост сейсмической активности в районах интенсивной добычи углеводородов из низкопроницаемых пластов связан преимущественно с закачкой больших объемов жидкости в недра (в частности, при утилизации попутных вод через нагнетательные скважины), а не с самой операцией ГРП [9]. Различия в сейсмическом отклике объясняются тем, что суммарный объем воды и размеры зоны высокого порового давления при длительной закачке значительно превышают аналогичные показатели краткосрочных операций ГРП [10]. Физически схожим процессом является нагнетание воды под высоким давлением для создания искусственных резервуаров в целях использования глубинной геотермальной энергии; этот процесс также вызывает сейсмические толчки и в ряде случаев приводил к приостановке крупномасштабных геотермальных проектов. Это свидетельствует об общности геодинамических рисков, сопряженных с масштабной закачкой жидкостей в недра [11]. В то же время микросейсмический мониторинг служит стандартным инструментом контроля, позволяющим оперативно определять положение и геометрию трещины гидроразрыва, а также оценивать проницаемость пласта [12].

Обращение со сточными водами и состав технологических жидкостей. При разработке трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) в состав жидкостей для ГРП все чаще включают водорастворимые полимеры (в частности, полиакриламид) и различные сшивающие агенты [13]. Выбор системы реагентов, обладающей достаточной агрегативной устойчивостью, - это важнейшая техническая (и, как следствие, экологическая) задача при создании таких составов, поскольку

поведение смеси в пласте и в извлекаемых впоследствии сточных водах напрямую зависит от ее коллоидно-химических свойств [14]. Кроме того, некоторые компоненты технологических жидкостей способны повышать гидрофильность горных пород и приводить к образованию устойчивых гидратных оболочек внутри поровых каналов. Это усложняет производственные операции и последующее обращение с отработанными жидкостями, требуя строгого контроля состава реагентов еще на этапе проектирования состава жидкости для гидроразрыва пласта.

Риски для качества атмосферного воздуха. При освоении месторождений трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) возрастает опасность выбросов попутного нефтяного газа (ПНГ), поскольку такие объекты часто расположены в удаленных районах с недостаточно развитой инфраструктурой. Это особенно актуально на начальных этапах создания сетей сбора газа. По сравнению с традиционными месторождениями, высокая степень геологической неоднородности низкопроницаемых коллекторов [15] требует бурения большего числа скважин и проведения повторных операций гидроразрыва пласта для поддержания рентабельных уровней добычи. При прочих равных условиях это приводит к увеличению общего объема технологических выбросов и сжигания газа на факелах в расчете на единицу добытой нефти.

Риски, обусловленные масштабами освоения и сложностью геологического строения. Помимо научных и финансовых сложностей, разработка трудноизвлекаемых запасов нефти в сложных коллекторах усугубляет воздействие на окружающую среду, увеличивая экологические издержки нефтегазовых и нефтехимических компаний [16]. Независимо от конкретного географического положения месторождения, этот эффект значительно усиливается при полномасштабном освоении объекта из-за создания обширной инфраструктуры (кустов скважин, дорог, трубопроводов),

что создает соответствующую совокупную нагрузку на окружающие ландшафты и экосистемы.

Обсуждение результатов

Анализ показывает, что профиль экологических рисков при проведении гидроразрыва пласта (ГРП) на месторождениях трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ) качественно отличается от такового при традиционной добыче, прежде всего из-за интенсивности воздействия: присущие низкопроницаемым коллекторам геологические характеристики обуславливают многостадийность операций, повышенный расход технологических жидкостей и необходимость более плотной сетки скважин [17]. Это свидетельствует о том, что снижение экологических рисков требует системного подхода, охватывающего весь проект разработки, а не простого регулирования отдельных операций ГРП.

С практической точки зрения крайне важно разграничивать источники геодинамических рисков, а именно сам процесс ГРП и закачку значительных объемов сопутствующих сточных вод в поглощающие скважины [4, 5]. Такое разграничение означает, что усилия по регулированию и мониторингу должны быть сосредоточены не только на технологии ГРП (которую часто ошибочно считают единственным источником наведенной сейсмичности), но и на процедурах утилизации технологических сточных вод.

Управление гидрогеологическими рисками требует разработки независимых технологий мониторинга, в частности методов изотопной гидрологии, позволяющих объективно выявлять источники загрязнения подземных вод и определять ответственность недропользователя [3]. Аналогично ситуации с геодинамическими угрозами, микросейсмический мониторинг позволяет отслеживать геометрию трещин и, как следствие, предотвращать их нежелательное распространение за пределы целевого интервала [4].

Особого внимания заслуживает и химический аспект: переход на составы на основе водорастворимых полимеров с контролируемой агрегативной устойчивостью [6] может снизить риски, связанные с миграцией и накоплением реагентов, поведение которых трудно прогнозировать; однако это требует дополнительных исследований токсикологических свойств таких составов, а также разработки эффективных схем очистки и утилизации сопутствующих сточных вод непосредственно на промысле. Наконец, общая практика разработки низкопроницаемых коллекторов [1, 7] показывает, что переход от опытно-промышленных работ к полномасштабной разработке трудноизвлекаемых запасов сопряжен с кумулятивной экологической нагрузкой, определяемой как пространственным масштабом развития инфраструктуры, так и самой технологией ГРП. Это делает необходимым включение оценки совокупного воздействия в проектную документацию на ранних этапах планирования, независимо от конкретного месторождения или региона.

Заключение

Результаты исследования свидетельствуют о том, что применение гидроразрыва пласта для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти сопряжено со сложным комплексом взаимосвязанных экологических угроз. К числу таких проблем относятся: загрязнение поверхностных и подземных вод вследствие утечек и нарушения герметичности скважин; наведенная сейсмичность, связанная преимущественно с масштабной закачкой попутно добываемых вод; риски, обусловленные составом и обращением с технологическими жидкостями; повышенные выбросы в атмосферу из-за недостаточного развития инфраструктуры сбора газа; а также совокупное воздействие на ландшафт, усугубляемое геологической сложностью и значительными пространственными масштабами месторождений трудноизвлекаемых запасов.

Степень серьезности этих проблем зависит от уровня экологической защиты и развитости системы мониторинга на конкретном объекте, интенсивности и частоты проведения операций гидроразрыва пласта (ГРП), состава используемых реагентов, а также от геологической неоднородности пласта.

Принципиальная возможность обеспечения экологической безопасности при разработке трудноизвлекаемых запасов подтверждается системным характером выявленных рисков и наличием проверенных инструментов контроля, таких как изотопная гидрология, микросейсмический мониторинг и технологии подбора реагентов с заданными свойствами. Однако это требует внедрения данных методов в проектные решения на всех этапах разработки месторождения, а не только непосредственно в процессе проведения ГРП. Практическая значимость исследования заключается в обосновании необходимости комплексного подхода к управлению экологическими аспектами проектов по освоению трудноизвлекаемых запасов нефти, дифференцированного в зависимости от типа рисков. Такой подход предполагает использование технологических жидкостей с контролируемыми и минимально токсичными свойствами, непрерывный сейсмический и гидрохимический мониторинг, предварительную гидрогеологическую оценку территории, а также создание инфраструктуры для сбора и утилизации попутного газа и сточных вод.

Библиографический список:

1. KMG. Гидроразрыв пласта: технология, меняющая правила игры в нефтедобыче [Электронный ресурс]. 2025. URL: <https://www.kmg.kz/ru/press-center/articles/grp/>
2. Tagiyev Sh. Hard-to-extract oil reserves and the challenges of their extraction: increasing the oil recovery of hard-to-extract reserves and the problem of their

- extraction // Мировая наука. – 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/trudnoizvlekaemye-zapasy-nefti-i-problemy-ih-dobychi-uvelechenie-nefteotdachi-trudnoizvlekaemyh-zapasov-nefti-i-problema-ih-dobychi>
3. International Atomic Energy Agency. Гидроразрыв пласта: оценка воздействия на окружающую среду // Бюллетень МАГАТЭ. 2019;60(1). URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull60-1/6012223_ru.pdf
4. Сейсмичность при разработке месторождений углеводородов // Neftegaz.RU. 2022. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/dobycha/755738-seysmichnost-pri-razrabotke-mestorozhdeniy-uglevodorodov/>
5. Как закачка воды под землю вызывает землетрясения, которые невозможно предугадать // iXBT Live. 2026. URL: <https://www.ixbt.com/live/science/kak-zakachka-vody-pod-zemlyu-vyzyvaet-zemletryaseniya-kotorye-nevozmozhno-predugadat.html>
6. Технологические жидкости на основе водорастворимых полимеров для повышения нефтеотдачи пластов и водоизоляционных работ // Neftegaz.RU. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/promyslovaya-khimiya/786775-tekhnologicheskie-zhidkosti-na-osnove-vodorastvorimyykh-polimerov-dlya-povysheniya-nefteotdachi-plast/>
7. Условия залегания трудноизвлекаемой нефти в сложно построенных коллекторах // Neftegaz.RU. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/geologorazvedka/819011-usloviya-zalaganiya-nefti-bazhenovskoy-svity-/>

8. Галлямов А.Р. Эффективность применения гидроразрыва пласта // Вестник науки. – 2025. - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnost-primeneniya-gidrorazryva-plasta>
9. Фрекинг - гидроразрыв пласта // Greenium. 2025. URL: <https://greenium.ru/15395/>
10. Global Methane Initiative. Мировые выбросы метана и возможности их ликвидации [Электронный ресурс]. URL: https://www.globalmethane.org/documents/GMI_Mitigation-Factsheet_Russian.pdf
11. Global Methane Initiative. Глобальные выбросы метана и возможности их снижения [Электронный ресурс]. URL: https://www.globalmethane.org/documents/methane_analysis_fs_rus.pdf
12. International Monetary Fund. Для достижения целевых уровней повышения мировой температуры необходимо снизить выбросы метана // IMF Blog. 2022. URL: <https://www.imf.org/ru/blogs/articles/2022/11/02/methane-emissions-must-fall-for-world-to-hit-temperature-targets>
13. Рекультивация загрязненных земель // Техническая библиотека Neftegaz.RU. URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/ekologiya-pozharnaya-bezopasnost-tekhnika-bezopasnosti/142016-rekultivatsiya-zagryaznennykh-zemel/>
14. ГОСТ Р 57447-2017. Наилучшие доступные технологии. Рекультивация земель и земельных участков, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами. Основные положения. - М.: Стандартинформ, 2017.
15. Производственный опыт рекультивации нарушенных земель, предоставленных для осуществления геологического изучения недр // Леса России и хозяйство в них. - 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proizvodstvennyy-opyt-rekultivatsii->

narushennyh-zemel-predostavlennyh-dlya-osuschestvleniya-geologicheskogo-izucheniya-nedr

16. Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации. Проблемы рекультивации земель, загрязненных нефтесодержащими отходами: материалы круглого стола [Электронный ресурс]. URL: <http://council.gov.ru/activity/activities/roundtables/32394/>
17. Утилизация бурового шлама с последующим вовлечением в ресурсооборот // Neftegaz.RU. URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/nefteservis/730148-utilizatsiya-burovogo-shlama-s-posleduyushchim-vovlecheniem-v-resursooborot/>