

УДК 622.276
МРНТИ 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>

Получена: 13.09.2024.
Одобрена: 18.03.2025.
Опубликована: 31.03.2025.

Оригинальное исследование

Анализ применения проппантного ГРП при освоении газоконденсатных месторождений со слабо проницаемыми коллекторами нижневизейских и серпуховских отложений

Р.А. Юсубалиев, Б.Р. Туленбаева, А.Б. Коныс

КазНИГРИ, г. Атырау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В условиях нарастающей нехватки газа в стране, роста внутреннего потребления газа и необходимости увеличения его добычи, особенно на месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, повышение эффективности разработки газовых месторождений становится всё более актуальным.

Цель. Оптимизация добычи месторождений с низкопроницаемыми коллекторами с использованием проппантного гидроразрыва пласта (далее – ГРП), направленная на повышение проницаемости пластов и улучшение производительности скважин.

Материалы и методы. Объектом исследования является газоконденсатное месторождение X, расположенное в Мойынкумском прогибе Шу-Сарысуйской впадины в Жамбылской области. В ходе исследования проведён детальный анализ эффективности повторных операций ГРП с учётом тоннажности проппанта. На основе этого предложена методика оптимизации параметров повторного ГРП, заключающаяся в корректировке объёма закачиваемого проппанта для изменения геометрии трещин и повышения продуктивности скважин. Дополнительно разработан новый подход к адаптации методики ГРП для условий, характеризующихся высоким риском накопления жидкости в стволе скважины. В отличие от традиционных решений, предложена комплексная стратегия стабилизации добычи, включающая интеграцию механизированного удаления жидкости (колтюбинг, пенно-ингибирующая шашка, плунжерный лифт).

Результаты. Выявлено, что сохранение первоначального объёма закачки при повторных операциях ГРП не приводит к значительному увеличению дебита газа. Анализ данных после проведения ГРП подтвердил эффективность применённой стратегии, что выражается в изменении газоконденсатного фактора и стабилизации дебита. Кроме того, в некоторых скважинах впервые использованы растворимые волокна в процессе ГРП. Анализ показал, что их применение привело к положительным результатам – улучшению проводимости трещин и увеличению продуктивности скважин, что делает данную технологию перспективной для дальнейшего внедрения.

Заключение. Итоги исследования показывают, что первичные ГРП обеспечивают более значительный прирост дебита газа по сравнению с повторными операциями, что подчеркивает важность тщательного выбора времени и объёма проппанта для максимизации эффективности повторных ГРП. На месторождении X ГРП остается ключевым мероприятием для увеличения производительности новых скважин, при этом рекомендуется проводить исследования кривых восстановления давления до и после операций для мониторинга эффектов и корректировки технологии. Учитывая особенности коллектора и интерференцию давления, необходимо тщательно подбирать дизайн операции и объём проппанта для достижения оптимальных результатов.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, газоконденсатное месторождение, низкопроницаемые коллекторы, повторные операции, оптимизация добычи, увеличение притока, планирование ГРП.

Как цитировать:

Юсубалиев Р.А., Туленбаева Б.Р., Коныс А.Б. Анализ применения проппантного ГРП при освоении газоконденсатных месторождений со слабо проницаемыми коллекторами нижневизейских и серпуховских отложений // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2025. Том 7, №1. С. 66–78.

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>.

UDC 622.276

CSCSTI 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>

Received: 13.09.2024.

Accepted: 18.03.2025.

Published: 31.03.2025.

Original article

Analysis of the Application of Proppant Hydraulic Fracturing in the Development of Gas Condensate Fields with Low Permeable Reservoirs of the C_1V_1 and C_1sr Deposits

Renat A. Yussubaliyev, Bayan R. Tulenbayeva, Akbayan B. Konys

KazNIGRI, Atyrau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: The ongoing shortage of natural gas in the country necessitates enhanced efficiency in gas field development. Alongside domestic gas consumption, the demand for higher production volumes, particularly from low-permeability reservoirs, further emphasizes the relevance of this study.

Aim: To optimize the production in fields with low-permeability reservoirs through proppant hydraulic fracturing (HF) to increase the permeability of formations and improve well productivity.

Materials and methods: The study's object is the gas condensate field X, located in the Moyynkum trough of the Shu-Sarysu depression in the Zhambyl region. During the study, a comprehensive analysis was conducted on the efficiency of refracturing operations, with a specific focus on proppant tonnage. As a result, a methodology for optimizing the parameters of refracturing was proposed. This methodology involves adjusting the volume of injected proppant to alter the geometry of fractures and enhance well productivity. Furthermore, a novel approach to adapting hydraulic fracturing techniques for conditions with a high risk of fluid accumulation in the wellbore has been developed. Unlike conventional solutions, this approach introduces a comprehensive production stabilization strategy that incorporates mechanized fluid removal methods, such as coiled tubing, foam-inhibiting check valves, and plunger elevators.

Results: It was determined that maintaining the initial injection volume during repeated HF operations does not significantly enhance the gas flow rate. An analysis of the post-fracturing data confirmed the effectiveness of the applied strategy, as evidenced by changes in the gas-condensate factor and the stabilization of flow rates. Additionally, soluble fibers were utilized for the first time in some wells during the HF process. The analysis indicated that their application yielded positive outcomes, including improved fracture conductivity and increased well productivity, suggesting that this technology holds promise for future implementation.

Conclusion: The findings of the study indicate that it yields higher gas production gains compared to refracturing. This highlights the significance of precise timing and careful selection of proppant volume to optimize the effectiveness of refracturing. In the X field, HF continues to be a crucial intervention for enhancing the productivity of new wells. It is advisable to conduct pre- and post-operation pressure recovery curve analyses to monitor impacts and refine the technology used. Considering the reservoir characteristics and potential pressure interferences, the operation's design and the proppant volume must be meticulously planned to achieve the best possible outcomes.

Keywords: hydraulic fracturing (HF); gas condensate field; low-permeability reservoirs; refracturing; production optimization; inflow enhancement; HF planning.

To cite this article:

Yussubaliyev RA, Tulenbayeva BR, Konys AB. Analysis of the Application of Proppant Hydraulic Fracturing in the Development of Gas Condensate Fields with Low Permeable Reservoirs of the C_1V_1 and C_1SR Deposits. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2025;7(1):66–78. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>.

ӨОЖ 622.276.
ГТАХР 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>

Қабылданды: 13.09.2024.

Мақұлданды: 18.03.2025.

Жарияланды: 31.03.2025.

Түпнұсқа зерттеу

Төменгі визиялық және серпухов шөгінділерінің өткізгіштігі төмен коллекторлары бар газ конденсатты кен орындарын игеру кезінде проппантты ҚГЖ қолдануды талдау

Р.А. Юсубалиев, Б.Р. Туленбаева, А.Б. Қоныс

ҚазҒЗҒБИ, Атырау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Елімізде газ тапшылығының өсуі, газды ішкі тұтынудың өсуі және оны өндіруді ұлғайту қажеттілігі жағдайында, әсіресе өткізгіштігі төмен коллекторлары бар кен орындарында газ кен орындарын игеру тиімділігін арттыру барған сайын өзекті бола түсуде.

Мақсаты. Қабаттардың өткізгіштігін арттыруға және ұңғымалардың өнімділігін жақсартуға бағытталған қабаттың пропантты гидравликалық жаруын (бұдан әрі – ҚГЖ) пайдалана отырып, өткізгіштігі төмен коллекторлары бар кен орындарын өндіруді оңтайландыру.

Материалдар мен әдістер. Зерттеу нысаны Жамбыл облысындағы Шу-Сарысу ойпатының Мойынқұм ойпатында орналасқан Х газ конденсатты кен орны болып табылады. Зерттеу барысында пропанттың тоннасын ескере отырып, ҚГЖ қайталама операцияларының тиімділігіне егжей-тегжейлі талдау жүргізілді. Осының негізінде жарықтардың геометриясын өзгерту және ұңғымалардың өнімділігін арттыру үшін айдалатын пропанттың көлемін түзетуден тұратын қайталама ҚГЖ параметрлерін оңтайландыру әдістемесі ұсынылды. Ұңғыма оқпанында сұйықтықтың жиналуының жоғары қауіпмен сипатталатын жағдайлар үшін ҚГЖ әдістемесін бейімдеудің жаңа тәсілі қосымша әзірленді. Дәстүрлі шешімдерден айырмашылығы, сұйықтықты механикаландырылған жоюды (колтубинг, көбікті тежейтін дойбы, поршеньді лифт) біріктіруді қамтитын өндірісті тұрақтандырудың кешенді стратегиясы ұсынылды.

Нәтижелері. ҚГЖ қайталама операциялары кезінде бастапқы айдау көлемін сақтау газ дебитінің айтарлықтай ұлғаюына әкелмейтіні анықталды. ҚГЖ жүргізгеннен кейінгі деректерді талдау қолданылған стратегияның тиімділігін растады, бұл газ конденсат факторының өзгеруінен және дебиттің тұрақтануынан көрінеді. Сонымен қатар, кейбір ұңғымаларда ҚГЖ процесінде еритін талшықтар алғаш рет қолданылған. Талдау көрсеткендей, оларды қолдану оң нәтижелерге әкелді – жарықтардың өткізгіштігін жақсарту және ұңғымалардың өнімділігін арттыру, бұл технологияны одан әрі енгізу үшін перспективалы етеді.

Қорытынды. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, бастапқы ҚГЖ қайталанатын операцияларға қарағанда газ дебитінің айтарлықтай өсуін қамтамасыз етеді, бұл қайталанатын ҚГЖ тиімділігін арттыру үшін пропанттың уақыты мен көлемін мұқият таңдаудың маңыздылығын көрсетеді. Х кен орнында ҚГЖ жаңа ұңғымалардың өнімділігін арттыру үшін негізгі іс-шара болып қала береді, бұл ретте әсерлерді мониторинг жасау және технологияны түзету үшін операцияларға дейін және одан кейін қысымды қалпына келтіру қисықтарын зерттеу жүргізу ұсынылады. Коллектордың ерекшеліктері мен қысым интерференциясын ескере отырып, оңтайлы нәтижеге қол жеткізу үшін операцияның дизайны мен пропант көлемін мұқият таңдау керек.

Негізгі сөздер: қабатты гидравликалық жару, газ конденсатты кен орны, өткізгішшілігі төмен коллектор, қайталанатын операциялар, өндіруді оңтайландыру, ағынның артуы, ҚГЖ жоспарлау.

Дәйексөз келтіру үшін:

Юсубалиев Р.А., Туленбаева Б.Р., Қоныс А.Б. Төменгі визиялық және серпухов шөгінділерінің өткізгіштігі төмен коллекторлары бар газ конденсатты кен орындарын игеру кезінде пропантты ҚГЖ қолдануды талдау // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы. 2025. 7 том, №1. 66–78 б.

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108780>.

Введение

Газ является важным источником энергии и играет ключевую роль в экономике Казахстана. В последние годы в стране наблюдается значительный рост внутреннего потребления газа, что приводит к нехватке этого ресурса и актуализирует необходимость в его оптимизации и увеличении добычи. Решение этой проблемы требует эффективных технологий для разработки газовых месторождений, особенно тех, которые характеризуются низкой проницаемостью коллекторов.

Месторождение X, расположенное в Мойынкумском прогибе Шу-Сарысуиской впадины в Жамбылской области, представляет собой важный элемент в стратегии повышения газодобычи Казахстана. Это месторождение относится к нижневизейским и серпуховским отложениям и обладает значительными запасами газа, которые требуют специального подхода для эффективного извлечения. Проблема с низкой проницаемостью коллекторов делает его особенно сложным для разработки, что требует применения передовых технологий [1].

Одной из таких технологий является ГРП, который представляет собой метод увеличения проницаемости пласта путем создания трещин в горных породах. Этот метод позволяет значительно повысить приток газа к скважине, улучшая тем самым продуктивность и эффективность разработки месторождения. Важность ГРП возрастает в условиях низкопроницаемых коллекторов, таких как на месторождении X, где традиционные методы добычи не всегда дают удовлетворительные результаты [2].

Месторождение X представляет собой многопластовую структуру с двумя основными горизонтами. Серпуховский горизонт является газоконденсатным и состоит из мелко-детритовых известняков. Толщина пластов в этом горизонте варьируется от 1,2 до 12,6 м с пористостью от 10 до 14%. Этот горизонт имеет пластово-сводовый тип залежи. Нижневизейский горизонт состоит из мелко-детритовых известняков, песчаников и алевролитов. Толщина пластов в нижневизейском горизонте колеблется от 3,6 до 36,4 м, а средняя пористость составляет 13,6%. Этот горизонт также относится к пластово-сводовому типу залежи.

Разработка месторождения X началась в 2003 г., и на начальном этапе (2004–2009 гг.) наблюдался рост годовых отборов газа, что было связано с увеличением фонда скважин. Однако в дальнейшем произошло снижение добычи газа, обусловленное уменьшением дебита скважин из-за естественного падения пластового давления (рис. 1). В настоящее время фонд скважин распределен следующим образом: 71% составляют эксплуатационные скважины, 3% – наблюдательные, 26% – ликвидированные, завершившие своё геологическое назначение. Анализ запасов газа и конденсата показывает,

что основная часть запасов сосредоточена в нижневизейском горизонте, где находится 98% от общего объема запасов. На сегодняшний день отбор газа составляет 36,7% от утвержденных начальных извлекаемых запасов.

Материалы и методы

Технология ГРП играет ключевую роль в улучшении добычи УВ из месторождения X. ГРП представляет собой передовую методику, которая значительно увеличивает проницаемость и продуктивность газовых скважин. Основной принцип работы ГРП заключается в создании и распространении трещин в горных породах с помощью впрыска жидкости под высоким давлением. Этот процесс существенно улучшает приток газа из пласта к скважине, тем самым обеспечивая более эффективную добычу углеводородов (далее – УВ) [3]. ГРП влияет на проницаемость призабойной зоны пласта через несколько ключевых механизмов. Во-первых, технология позволяет образовывать сеть трещин, что способствует более эффективному движению газа в пласте. Во-вторых, расширение существующих трещин увеличивает объём доступной пористости, что также способствует улучшению газовых выходов. В-третьих, снижение давления на забое скважины облегчает выход газа из пласта, что еще больше повышает его продуктивность [4].

В процессе ГРП на месторождении в двух скважинах первые использовались растворимые волокна, которые выполняли функцию временного каркаса, предотвращая сплошное уплотнение проппанта и обеспечивая его более равномерное распределение в трещине. После завершения операции и при достижении определённой температуры волокна растворяются, оставляя зазоры для прохождения газа, что способствует увеличению проводимости трещины.

Основная часть

Результаты гидродинамических исследований (далее – ГДИС) указывают на ухудшение фильтрационно-ёмкостных свойств (далее – ФЕС) продуктивных пластов, что связано с низкой проницаемостью пластов месторождения. Это требует применения специализированных технологий для эффективного извлечения УВ. Одной из таких технологий является ГРП [5].

В процессе ГРП на скважине X-1 были выполнены следующие операции: на стадии замещения в скважину было закачено 7,38 м³ линейного геля жидкости, затем 12,2 м³ сшитой жидкости с добавлением 0,591 т керамического проппанта фракции 20/40; на следующем этапе было закачено 7,08 м³ линейного геля при скорости 3,11 м³/мин. По завершении работы проведён анализ понижения давления, который позволил рассчитать чистое давление, давление смыкания трещины, эффективность жидкости и трение в призабойной зоне и в интервале

перфорации. Результаты анализа показали, что эффективность жидкости составила 46%, что выше первоначального плана в 40%. Давление трения на перфорацию и призабойную зону составило 2 атм.

Основной ГРП был проведён 14.05.2021 г. В процессе работы закачали сшитую подушку объемом 90 м³ с концентрацией реагентов HGA-48 и HGA-37 8 л/м³ при средней скорости подачи 4,2 м³/мин. В пласты было закачено 110 т проппанта фракции 20/40 производства Well Pro, из этого объема 109,8 т было закачено в пласт C_{1V1}. Конечная концентрация проппанта в блендере составила 971 кг/м³, а в интервале перфорации – 1005 кг/м³. Все запланированные объёмы проппанта и жидкости были успешно закачаны.

Результаты

По результатам проведённого ГРП выполнен анализ состояния призабойной зоны до и после операции ГРП с использованием данных ГДИС, включая интерпретацию кривых восстановления давления (далее – КВД). Полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении ФЕС призабойной зоны, что подтверждается снижением скин-фактора, который до и после операции имеет отрицательные значения (табл. 1), указывая на положительные изменения в состоянии призабойной зоны. Метод КВД играет ключевую роль в оценке эффективности ГРП, поскольку позволяет определить степень изменения проницаемости, выявить возможные повреждения или улучшения проводимости пласта, а также оценить радиус дренирования после гидроразрыва. Анализ кривых восстановления давления показал, что после проведения ГРП произошло увеличение коэффициента продуктивности, что свидетельствует

о снижении гидродинамического сопротивления в призабойной зоне и расширении области эффективного фильтрационного потока. Полученные результаты демонстрируют, что после ГРП проницаемость призабойной зоны увеличилась, что подтверждается изменением характеристик пластового давления и стабильностью показателей дебита скважины. Дальнейшее совершенствование методологии КВД, включая интеграцию с геомеханическим моделированием, позволит более точно прогнозировать поведение призабойной зоны и оптимизировать параметры проведения ГРП для максимального увеличения продуктивности скважины [6].

Также проведен мониторинг дебита скважины X-1, который до проведения ГРП после бурения составлял 2,3 тыс. м³/сут, тогда как проектный показатель был рассчитан на 25 тыс. м³/сут. После проведения ГРП дебит газа скважины X-1 приблизился к проектным значениям. Эти данные подтверждают эффективность проведённого ГРП и его положительное влияние на производительность скважины.

В 2021–2022 гг. на шести новых добывающих скважинах месторождения X был осуществлен ГРП с целью повышения продуктивности (табл. 2). Результаты показывают, что в пяти из них удалось добиться положительного эффекта, который выражается в значительном приросте дебита газа – от 6,9 до 59,9 тыс. м³/сут. Однако в одной из скважин ожидаемого результата не было достигнуто. Как видно на рис. 2, скважина находилась в зоне с пониженным пластовым давлением, что отрицательно повлияло на эффективность проведенной операции ГРП. Учитывая слабые ФЕС коллекторов и, вследствие этого, интерференцию давления, важность учёта энергетического состояния

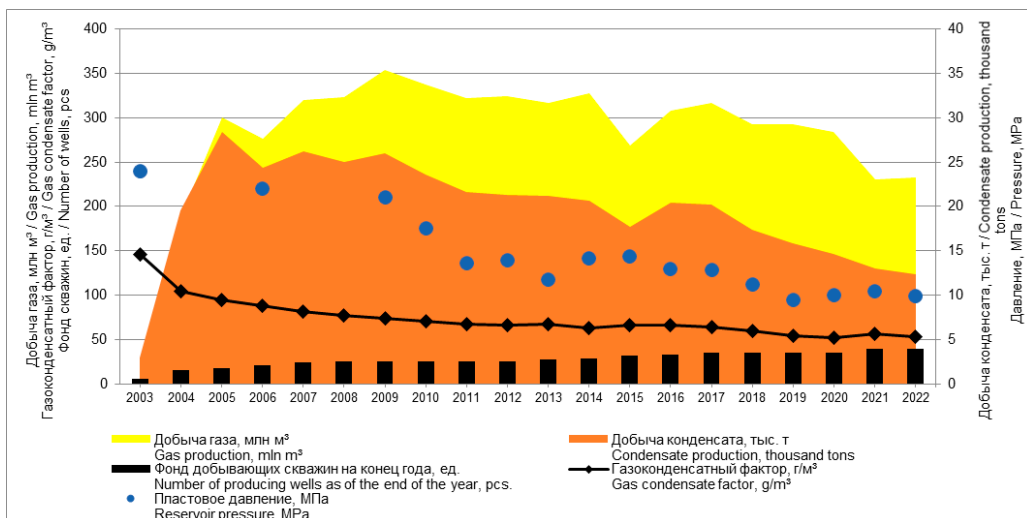


Рисунок 1. Динамика основных показателей разработки
Figure 1. Dynamics of the primary development indicators

Таблица 1. Результаты исследований призабойной зоны скважины X-1
Table 1. Research results of the Bottomhole Zone of Well X-1

Горизонт Horizon	Дата ГРП HF Date	До ГРП / before HF		После ГРП / after HF	
		проницаемость, 10^{-3}мкм^2 permeability, 10^{-3}mkm^2	скин-фактор skin factor	проницаемость, 10^{-3}мкм^2 permeability, 10^{-3}mkm^2	скин-фактор skin factor
C ₁ V ₁	26.01.2021	0,02	-2,3	0,7	-3,2

Таблица 2. Результаты ГРП в новых добывающих скважинах
Table 2. HF results in new production wells

№ скв. Well No.	Дата ГРП HF date	Дебит газа, тыс. м³/сут Gas flow rate, thousand m³ per day		Эффективность увеличения дебита газа, тыс. м³/сут Gas Flow Rate Increase Efficiency, thousand m³/day	Длительность эффекта, мес. Effect Duration, months
		до ГРП / before HF	после ГРП / after HF		
X-11	06.05.2021	0,2	7,1	6,9	3
X-12	14.05.2021	18,8	3,8	-15	нет эффекта no effect
X-13	23.08.2021	2,3	26,7	26,7	4
X-14	13.08.2021	0,1	59,9	59,9	7
X-15	21.12.2022	11,5	46,1	34,6	3
X-16	17.12.2022	0,5	27,6	27,1	6

залежи при выборе скважин для проведения ГРП остается актуальной. Для достижения максимального эффекта от ГРП необходимо тщательно подбирать кандидатов, основываясь на данных о давлении и других характеристиках пласта. Энергетическое состояние залежи играет критическую роль в успешности операции, и несоответствие параметров может существенно снизить эффективность ГРП.

На скважинах X-15 и X-16 ГРП впервые был выполнен с использованием растворимых волокон. Данная технология направлена на улучшение проводимости трещин за счёт предотвращения преждевременного оседания проппанта и образования зон с низкой фильтрационной способностью.

Дополнительно проведён анализ восстановления температуры после ГРП, т.к. растворимые волокна теряют свою структуру под воздействием термохимических процессов. Время полного растворения волокон рассчитано с учётом пластовых условий, и результаты показали, что их разложение происходило в течение 2–3 мес. после закачки. Это позволило минимизировать закупорку трещин и поддерживать их проводимость в течение более длительного времени.

Сравнительный анализ скважин X-15, X-16, где использовались растворимые волокна, и скважин, где применялся традиционный метод ГРП, показал, что средний прирост дебита газа после традиционного ГРП составил 25,04 тыс. м³/сут, в то время как при использовании растворимых волокон прирост составил 30,85 тыс. м³/сут, что на 23% выше. Средняя длительность эффекта после традиционного ГРП составила 4,2 мес., тогда как в скважинах с волокнами этот показатель увеличился до 6 мес. Восстановление температуры после ГРП в скважинах с растворимыми волокнами происходило в среднем на 15%

быстрее, что указывает на более стабильное термодинамическое поведение системы. Главное отличие традиционного ГРП от технологии с растворимыми волокнами заключается в механизме удержания проппанта и поддержании проводимости трещины. В традиционной методике основным фактором сохранения проводимости является механическая устойчивость проппанта к закрытию трещины, однако даже при применении высокопрочных керамических проппантов наблюдается постепенное ухудшение их распределения и снижение фильтрационной способности трещины [7]. Использование растворимых волокон позволяет избежать эффекта избыточной концентрации проппанта на определённых участках трещины, что снижает вероятность закупорки каналов. Кроме того, растворимые волокна создают дополнительные пути фильтрации, что позволяет дольше сохранять высокий дебит скважины.

Результаты исследования показывают, что технология растворимых волокон является перспективной для дальнейшего внедрения в низкопроницаемых газоконденсатных месторождениях. Основными преимуществами данной методики являются: увеличение продолжительности эффекта от ГРП, замедление закрытия трещины, снижение риска закупорки фильтрационных каналов, повышение стабильности добычи. В дальнейшем рекомендуется проведение дополнительных исследований для оптимизации состава растворимых волокон, определения оптимального времени их разложения и интеграции технологии с другими методами увеличения газоотдачи.

Исследования [8] показали, что в глубоких и ультраглубоких резервуарах основными проблемами при традиционном ГРП являются: быстрое закрытие трещин, снижение проводимости проппанта из-за его

уплотнения, а также образование осадков от жидкости разрыва. В данном экспериментальном исследовании, включающем моделирование процесса закачки в лабораторных условиях, было установлено, что при использовании растворимых волокон средняя проводимость трещины увеличивается на 15–20% по сравнению с традиционными методами ГРП. Это объясняется тем, что волокна временно удерживают каналы открытыми, предотвращая преждевременное оседание проппанта и его избыточную концентрацию в определённых зонах. В процессе растворения волокна высвобождают дополнительные пути фильтрации, что особенно эффективно при разработке газоконденсатных

месторождений, где интерференция давления и фазовые переходы могут значительно снижать продуктивность. Кроме того, авторы отмечают, что срок службы трещины после ГРП с использованием растворимых волокон увеличивается в среднем на 25–30%, что приводит к более стабильной добыче УВ в течение продолжительного времени [8].

В исследовании [9] различных систем флюидов, применяемых для ГРП, также обращают внимание на проблему остаточных повреждений пласта, связанных с использованием традиционных гелеобразующих жидкостей. Они отмечают, что полисахаридные гели, такие как гуар, широко применяемые

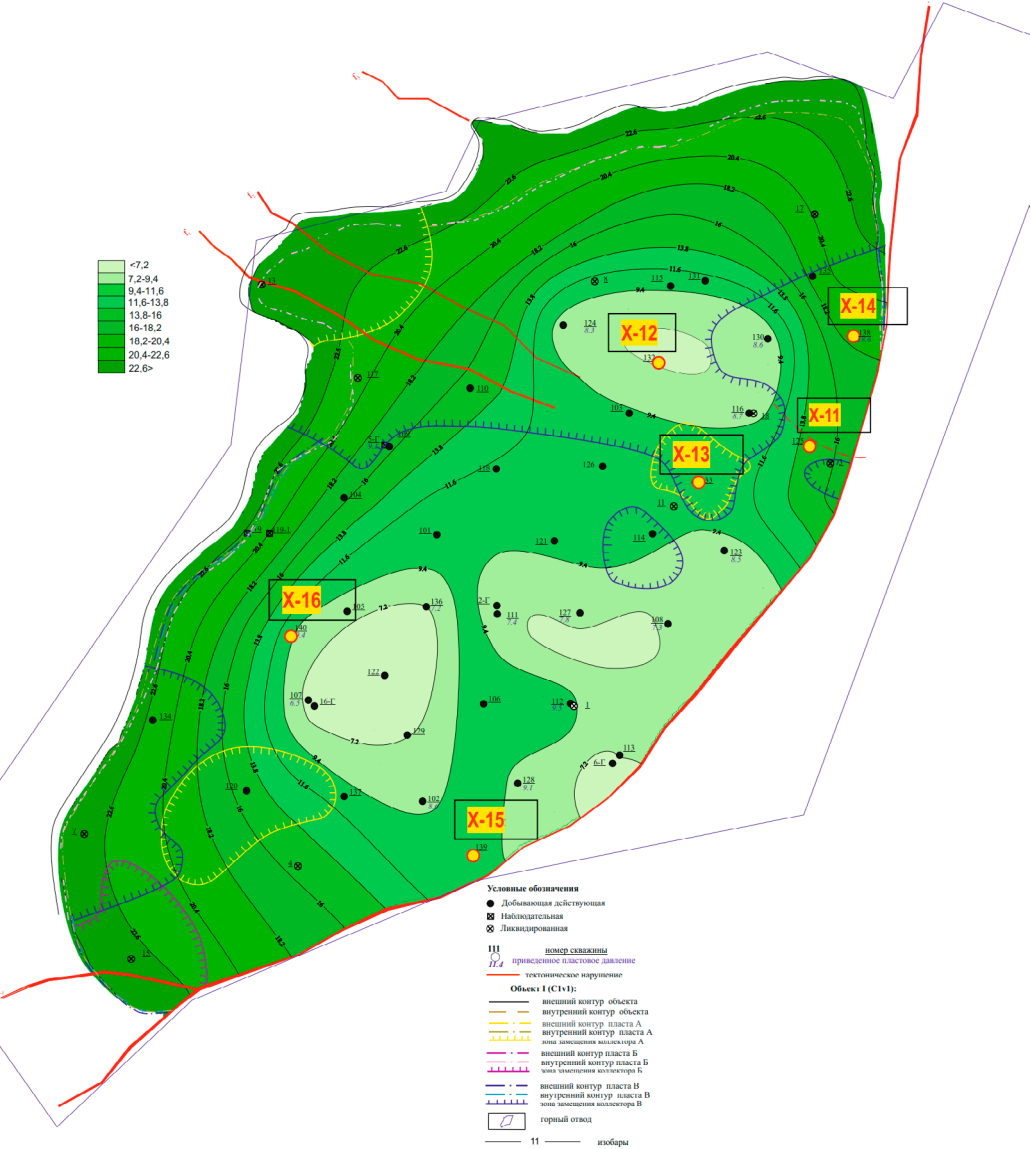


Рисунок 2. Карта изобар
Figure 2. Isobar map

в гидроразрыве, оставляют на стенках трещин остаточные осадки, которые могут снижать их проводимость на 10–40% в зависимости от температуры и проницаемости пласта. В качестве альтернативы рассматривается применение растворимых волокон, которые могут временно обеспечивать необходимую вязкость жидкости, а затем растворяться без образования остаточных продуктов. В ходе лабораторных тестов авторы продемонстрировали, что добавление растворимых волокон в жидкость ГРП повышает коэффициент восстановления проводимости трещины после разрыва с 60% до 85%, что снижает потери дебита на 20–25% по сравнению с традиционными методами. Это особенно важно для низкопроницаемых газоконденсатных коллекторов, где даже небольшие изменения в проводимости трещины могут существенно повлиять на суммарную добычу.

Таким образом, оба исследования подтверждают, что интеграция растворимых волокон в процесс ГРП является эффективной стратегией для повышения продуктивности скважин, улучшения проводимости трещин и продления периода высокой добычи. Результаты показывают, что использование данной технологии может стать важным элементом оптимизации ГРП, особенно в сложных низкопроницаемых газоконденсатных пластах.

Современные подходы к адаптации ГРП

Одной из основных причин снижения продуктивности газовых и газоконденсатных скважин является накопление жидкости в стволе скважины. Это происходит вследствие изменения фазового состояния углеводородной смеси, что приводит к образованию жидкостного столба, создающего противодавление на пласт. В результате снижается устьевое давление, что, в свою очередь, уменьшает производительность скважины. Для стабилизации добычи и предотвращения подобных ситуаций после проведения ГРП необходимо периодически осуществлять специальные мероприятия [10].

Дополнительно разработан новый подход к адаптации методики ГРП для условий, характеризующихся высоким риском накопления жидкости в стволе скважины. В отличие от традиционных решений, предложена комплексная стратегия стабилизации добычи, включающая интеграцию механизированных методов удаления жидкости с учетом гидродинамических характеристик пласта. В частности, предложена адаптация параметров ГРП с учётом последующей необходимости удаления жидкости. Для этой цели рассматриваются такие технологии, как колтюбинг, пенно-ингибирующая шашка (далее – ПИШ) и плунжерный лифт. Как видно на представленных диаграммах (рис. 3), после

проведения этих мероприятий наблюдается положительный эффект, который отражается в изменении газоконденсатного фактора, что подтверждает успешный вынос жидкости из призабойной зоны. Сравнительный анализ скважин с традиционной и комплексной стратегией показал, что во втором случае средняя стабильность добычи увеличивается на 18–25%, а снижение дебита замедляется. На основе полученных результатов можно сделать вывод о необходимости продолжения реализации этих мероприятий на месторождении. Дальнейшее применение соответствующих технологий позволит поддерживать эффективный процесс удаления жидкости с забоя скважин, что способствует стабилизации и увеличению добычи [11].

На месторождении X в 2014–2021 гг. было проведено 14 повторных ГРП на десяти скважинах (рис. 4). Средний интервал между первичными и повторными операциями составил 5–6 лет. По результатам повторных ГРП прирост дебита газа варьируется от 1 до 51,2 тыс. м³/сут. Это значительно меньше по сравнению с первичными операциями, где прирост достигал от 1 до 197 тыс. м³/сут.

Эти данные указывают на то, что первичные ГРП имеют более значительный эффект по сравнению с повторными операциями. Прирост дебита газа при повторных ГРП значительно ниже, что подчеркивает необходимость тщательного планирования и оценки при проведении таких операций для достижения оптимальных результатов [12]. Также проанализирована разница в тонажности проппанта при повторных ГРП, где выявлено, что при проведении повторных ГРП часто сохраняется тот же объём закачиваемого проппанта, что использовался в первичной операции (рис. 5). Сохранение первоначального объема проппанта не приводит к значительному увеличению дебита газа. Для повышения эффективности повторных ГРП рекомендуется пересмотреть дизайн операции и рассмотреть возможность увеличения объёма закачиваемого проппанта. Увеличение объёма может повлиять на геометрию трещин, что, в свою очередь, может способствовать увеличению дебита газа при повторных ГРП.

На месторождении X рассчитаны два варианта разработки с технико-экономическими показателями для оценки их эффективности. Первый вариант разработки предусматривает: (1) ввод в эксплуатацию одной бездействующей скважины; (2) бурение одной новой добывающей скважины с проведением ГРП; (3) перевод пяти скважин на возвратный объект. Этот вариант позволяет поддерживать проектный уровень добычи газа на уровне 249,2 млн м³/г. и конденсата 10,69 тыс. т/г.

Второй вариант разработки основан на проектных решениях первого варианта, но дополнительно включает: (1) бурение восьми

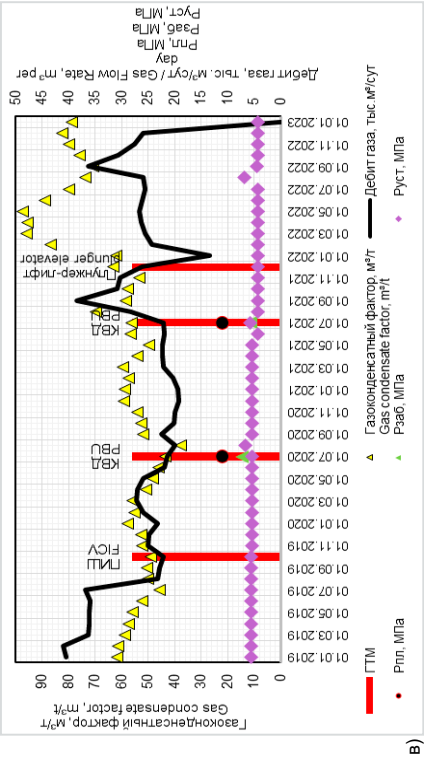
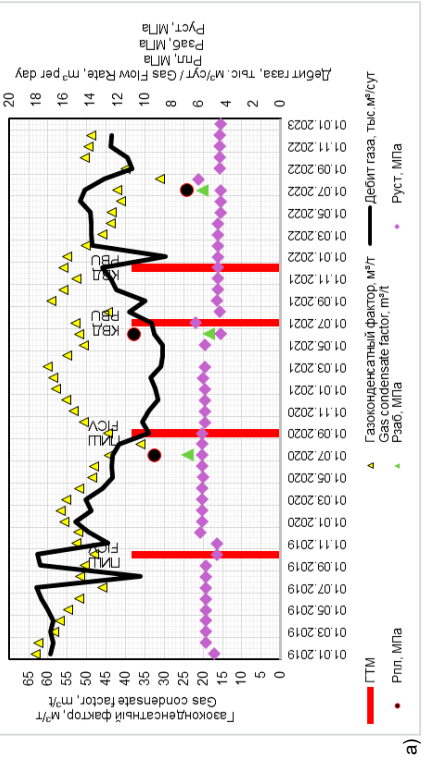
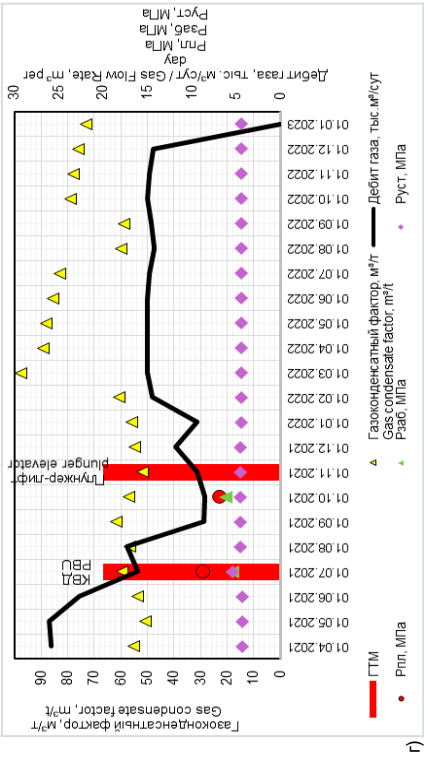
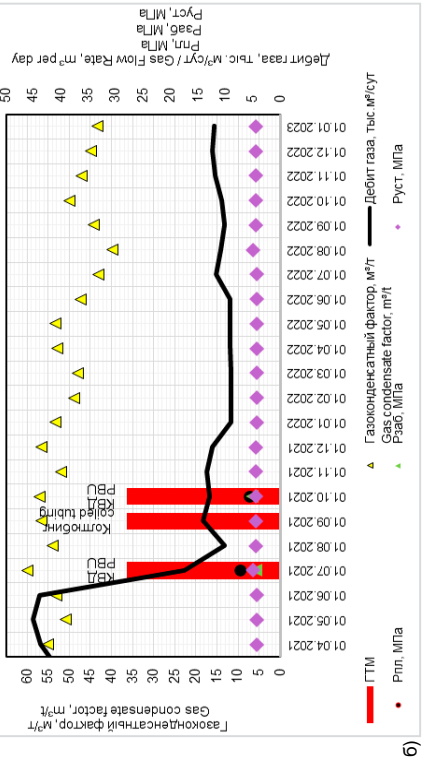


Рисунок 3. Динамика добычи скважин до и после проведения мероприятий по очистке призабойной зоны
Figure 3. Dynamics of well production before and after bottom-hole zone treatment

а) X-4; б) X-6; в) X-7; г) X-9

ГТМ – геолого-технические мероприятия / wellbore intervention; ПИШ / FICV – пенно-ингибирующая шапка / foam-inhibiting check valves; КВД / РВД – кривая восстановления давления / pressure build up; Рпл – пластовое давление, МПа / reservoir pressure, MPa; Рзаб – забойное давление, МПа / bottom-hole pressure, MPa; Рзаб – забойное давление, МПа / well-head pressure, MPa

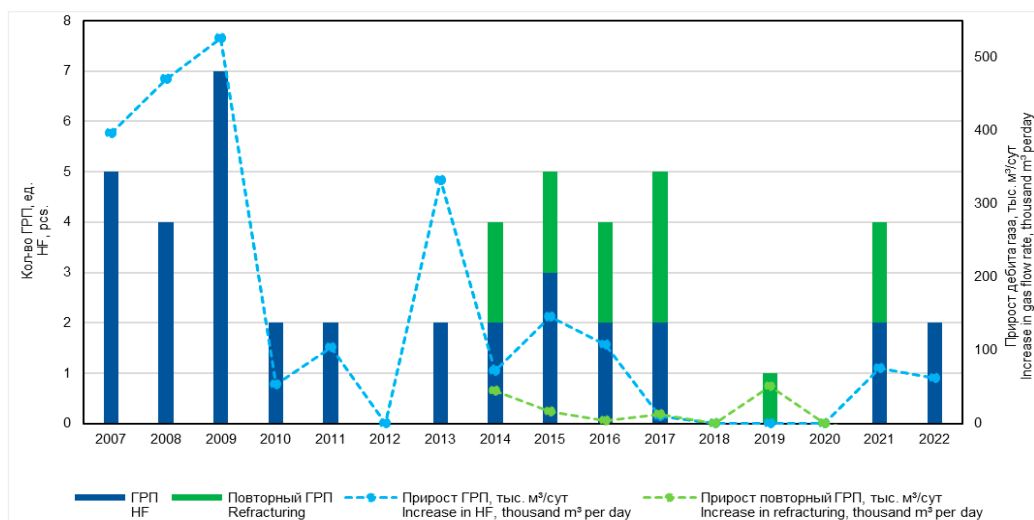


Рисунок 4. Динамика выполнения операций ГРП по годам

Figure 4. Dynamics of HF operations by years

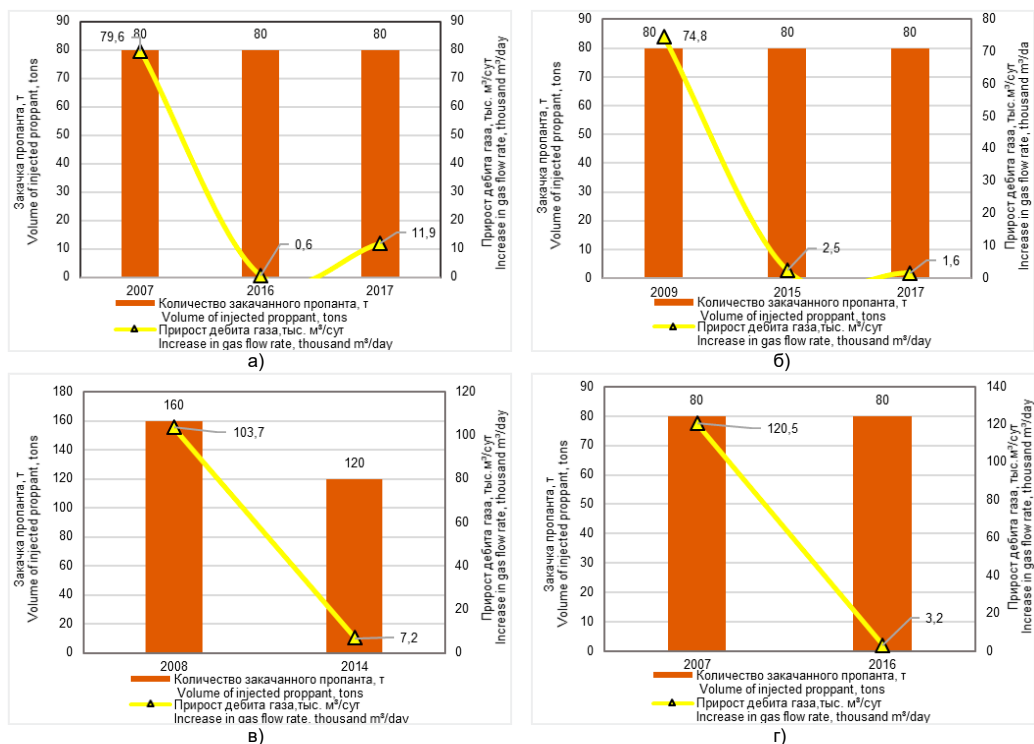


Рисунок 5. Изменение дебитов после повторных ГРП в зависимости от тоннажности закачанного проппанта

Figure 5. Change in flow rates after refracturing depending on the tonnage of injected proppant

а) X-5; б) X-7; в) X-8; г) X-9

новых добывающих скважин с проведением ГРП; (2) повторный ГРП в восьми скважинах из переходящего фонда; (3) резку бокового ствола; (4) очистку стволов скважин и вынос

жидкости с забоев для обеспечения стабильной добычи. В результате проектный уровень добычи газа возрастает до 259,9 млн м³/г., а конденсата – до 10,7 тыс. т/г.

Технико-экономическое сравнение вариантов

Второй вариант разработки, несмотря на более высокие капитальные затраты (13557,3 млн тг. против 684,5 млн тг.), обеспечивает значительный рост извлекаемых запасов:

- коэффициент извлечения газа увеличивается с 39,8% до 66,39%, а конденсата – с 25,4% до 35,71%;
- совокупная добыча газа возрастает с 9 612,8 до 16 021,0 млн м³ (+66,6%);
- совокупная добыча конденсата увеличивается с 534,8 до 754,3 тыс. т (+41%);
- чистые дисконтированные поступления при 10% ставке выше на 53,3% (24697,5 млн тг. против 16119,4 млн тг.).

Кроме того, государственные поступления также возрастают:

- суммарные налоговые платежи – с 13779,3 до 82 731,4 млн тг.;
- чистые дисконтированные поступления государству с 6 961,4 до 13 889,2 млн тг. (+99,6%).

Обсуждение

Применение ГРП на газоконденсатном месторождении X продолжает оставаться актуальным и востребованным методом повышения эффективности добычи УВ. Создание базы скважин-кандидатов для ГРП является важным шагом в планировании, позволяя более эффективно распределять ресурсы и достигать высоких результатов.

Результаты повторных ГРП показывают, что их эффект часто уступает первичным операциям, что связано с изменением свойств пласта после первого воздействия, и сохранение первоначального объёма закачки проппанта не всегда обеспечивает значительный прирост дебита. В связи с этим предложена методика оптимизации параметров повторного ГРП, включающая корректировку объёма проппанта и его концентрации, а также регулирование вязкости жидкости разрыва для улучшения геометрии трещин. Такой подход позволяет повысить эффективность повторных операций и продлить срок высокой продуктивности скважин.

На основе опыта применения ГРП на месторождении X можно предложить рекомендации для его эффективного использования на других

месторождениях с аналогичными геолого-физическими условиями. В частности, использование растворимых волокон в процессе ГРП продемонстрировало свою эффективность, обеспечивая более равномерное распределение проппанта, предотвращение преждевременного закрытия трещин и увеличение срока их проводимости. Полевые данные месторождения X показали, что скважины, обработанные с применением растворимых волокон, демонстрировали более высокую стабильность дебита по сравнению с традиционными методами ГРП.

Заключение

Анализ данных по повторным ГРП на месторождении X показывает, что для успешного повторного ГРП необходимо учитывать геомеханические параметры пласта, изменение свойств пород после первичного разрыва, а также взаимодействие между уже существующими и вновь создаваемыми трещинами. Оптимизация параметров ГРП, включая корректировку тоннажности проппанта и концентрации жидкости разрыва, позволит добиться увеличения продуктивности скважин и продления срока их рентабельной эксплуатации.

Полученные результаты и предложенные методики могут быть применены на других газоконденсатных месторождениях с низкопроницаемыми коллекторами, что позволит увеличить эффективность ГРП, минимизировать технико-экономические риски и повысить рентабельность добычи УВ. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование методологии прогнозирования эффекта от ГРП, интеграцию гидродинамического моделирования с геомеханическим анализом и разработку новых подходов к поддержанию высокой продуктивности скважин в условиях сложных коллекторов.

Несмотря на более высокие капитальные и эксплуатационные затраты, второй вариант разработки показывает значительно лучшие показатели как по добыче, так и по экономической эффективности. Продление рентабельного периода месторождения с 2047 г. до 2073 г., увеличение коэффициента извлечения газа и рост чистых дисконтированных доходов делают этот вариант предпочтительным.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существен-

ный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Юсубалиев Р.А. – редактирование рукописи, предоставление консультаций; Туленбаева Б.Р. – предоставление консультаций, проверка результатов, редактирование рукописи; Коныс А.Б. – анализ и проверка результатов, написание рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the

work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. The greatest contribution is distributed as follows: Renat A. Yussubaliyev – editing the manuscript, providing consultations; Bayan R. Tulenbayeva – providing consultations, checking the results, editing the manuscript; Akbayan B. Konys – analysis and verification of results, writing a manuscript.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширковский А.И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. Москва : Недра, 1979. 297 с.
2. Желтов Ю.П. Разработка нефтяных месторождений. Москва : Недра, 1986. 332 с.
3. Sheraz A., Atta M.K., Ijaz A., Osama H.K. Enhancing Recoveries from a Low Permeable Gas-Condensate Reservoir through Hydraulic-Fracturing & EOR Technologies // PAPG/SPE Pakistan Section Annual Technical Conference and Exhibition; November 21–23, 2016; Islamabad, Pakistan. Available from: <https://onepetro.org/SPEPATS/proceedings-abstract/16PATC/16PATC/SPE-185310-MS/192882> [cited 2024 Aug 12].
4. Чуфрин В.А., Сергеев И.В. Повышение эффективности разработки месторождений с низкопроницаемыми коллекторами // Вестник нефтяной и газовой промышленности. 2020. № 7. С. 45–52.
5. Мамбетов Ж.С. Медведев К.С. Анализ эффективности многоступенчатого гидроразрыва пласта в условиях низкопроницаемых коллекторов // Вопросы науки и образования. 2018. №26 (38). С. 98–107.
6. Smith J., Anderson P. Advancements in Proppant Technologies for Enhanced Gas Condensate Recovery // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 210. P. 45–61.
7. Стабинскас А.П., Султанов Ш.Х., Мухаметшин В.Ш., и др. Эволюция жидкости гидроразрыва пласта: от гуаровых систем к современным композициям // SOCAR Proceedings Special Issue. 2021. №2. С. 172–181. doi: [10.5510/OGP2021SI200599](https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200599).
8. Zhang K., Liu X.-F., Wang D.-B., et al. A review of reservoir damage during hydraulic fracturing of deep formations // Petroleum Science. 2024. Vol. 21. P. 384–409. doi: [10.1016/j.petsci.2023.11.017](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.11.017).
9. Barati R., Liang J.-T. A Review of Fracturing Fluid Systems Used For Hydraulic Fracturing of Oil and Gas Wells // Journal of Applied Polymer Science. 2014. Vol. 131, N 16. doi: [10.1002/app.40735](https://doi.org/10.1002/app.40735).
10. Buriak I. Improvement of Bottom-Hole Cleaning After Hydraulic Fracturing on Urengoy Oil and Gas Condensate Field // SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition; October 15–17, 2013; Moscow, Russia. Available from: <https://onepetro.org/SPEAEEC/proceedings-abstract/13AEEC/All-13AEEC/SPE-166861-MS/174033> [cited 2024 Sept 05].
11. Al Sultan A.H., Shaoul J.R., Park J., Zitha P.L.J. Case Study of Condensate Dropout Effect in Unconventional Gas/Condensate Reservoirs with Hydraulically Fractured Wells// SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition; January 11–13, 2022; Muscat, Oman. Available from: <https://onepetro.org/SPEIHFT/proceedings-abstract/20IHFT/2-20IHFT/D021S007R004/475667> [cited 2024 Sept 05].
12. Газдиев А.И. Опыт проведения повторного ГРП на газоконденсатных скважинах // Бурение и нефть. 2023. №7. С. 112–125. doi: [10.62994/2072-4799.2024.70.79.008](https://doi.org/10.62994/2072-4799.2024.70.79.008).

REFERENCES

1. Shirkovskiy A.I. *Razrabotka i ekspluatatsiya gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy*. Moscow: Nedra; 1979. 297 p. (In Russ).
2. Zheltov Y.P. *Razrabotka nefyanykh mestorozhdeniy*. Moscow: Nedra; 1986. 332 p. (In Russ).
3. Sheraz A, Atta MK, Ijaz A, Osama HK. Enhancing Recoveries from a Low Permeable Gas-Condensate Reservoir through Hydraulic-Fracturing & EOR Technologies. PAPG/SPE Pakistan Section Annual Technical Conference and Exhibition; 2016 Nov 21–23; Islamabad, Pakistan. Available from: <https://onepetro.org/SPEPATS/proceedings-abstract/16PATC/16PATC/SPE-185310-MS/192882>.
4. Chufirin VA, Sergeyev IV. Povisheniye effektivnosti razrabotki mestorozhdeniy s nizkopronitsaemyy kolektorami. *Vestnik nefyanyy i gazovoy promyshlennosti*. 2020;7:45–52. (In Russ).
5. Mambetov ZS, Medvedev KS. Analiz effektivnosti mnogozonnogo gidrozryva plasta v usloviyakh nizkopronitsaemykh kolektorov. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2018;26(38): 98–107.
6. Smith J, Anderson P. Advancements in Proppant Technologies for Enhanced Gas Condensate Recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022;210:45–61.
7. Stabinskas AP, Sultanov SK, Mukhametshin VS, et al. Evolution of Hydraulic Fracturing Fluid: from Guar Systems to Synthetic Gelling Polymers. SOCAR Proceedings Special Issue. 2021;2:172–181. doi: [10.5510/OGP2021SI200599](https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200599).
8. Zhang K, Liu X-F, Wang D-B, et al. A review of reservoir damage during hydraulic fracturing of deep formations. *Petroleum Science*. 2024;21:384–409. doi: [10.1016/j.petsci.2023.11.017](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.11.017).
9. Barati R, Liang J-T. A Review of Fracturing Fluid Systems Used For Hydraulic Fracturing of Oil and Gas Wells. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(16). doi: [10.1002/app.40735](https://doi.org/10.1002/app.40735).
10. Buriak I. Improvement of Bottom-Hole Cleaning After Hydraulic Fracturing on Urengoy Oil and Gas Condensate Field. SPE Arctic and Extreme Environments Technical Conference and Exhibition; 2013 Oct 15–17; Moscow, Russia. Available from: <https://onepetro.org/SPEAEEC/proceedings-abstract/13AEEC/All-13AEEC/SPE-166861-MS/174033>.

11. Alsultan AH, Shaoul JR, Park J, Zitha PLJ. Case Study of Condensate Dropout Effect in Unconventional Gas/Condensate Reservoirs with Hydraulically Fractured Wells. SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference & Exhibition; 2022 Jan 11–13; Muscat, Oman. Available from: <https://onepetro.org/SPEIHFT/proceedings-abstract/20IHFT/2-20IHFT/D021S007R004/475667>.
12. Gazdiyev AI. Opyt provedeniya povtornogo GRP na gazokondensatnykh skvazhinakh. *Burenije i nef't*. 2023;7:112–125. doi: [10.62994/2072-4799.2024.70.79.008](https://doi.org/10.62994/2072-4799.2024.70.79.008).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**Юсубалиев Ренат Асылбекович**ORCID [0009-0007-3525-1984](https://orcid.org/0009-0007-3525-1984)e-mail: yussubaliyev.r@kaznigri.kz.**Туленбаева Баян Руслановна**ORCID [0009-0007-9454-2490](https://orcid.org/0009-0007-9454-2490)e-mail: b.tulenbayeva@kaznigri.kz.***Қоныс Ақбаян Бекболатқызы**ORCID [0000-0001-7240-3595](https://orcid.org/0000-0001-7240-3595)e-mail: a.konys@kaznigri.kz.**AUTHORS' INFO****Renat A. Yussubaliyev**ORCID [0009-0007-3525-1984](https://orcid.org/0009-0007-3525-1984)e-mail: yussubaliyev.r@kaznigri.kz.**Bayan R. Tulenbayeva**ORCID [0009-0007-9454-2490](https://orcid.org/0009-0007-9454-2490)e-mail: b.tulenbayeva@kaznigri.kz.***Akbyan B. Konys**ORCID [0000-0001-7240-3595](https://orcid.org/0000-0001-7240-3595)e-mail: a.konys@kaznigri.kz.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author