

УДК 622.276
МРНТИ 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>

Получена: 20.08.2024.

Одобрена: 11.12.2024.

Опубликована: 31.12.2024.

Оригинальное исследование

Перспективы повышения эффективности гидроразрыва пласта с использованием высокотехнологичных проппантов на месторождениях Атырауского региона

А.Н. Бухарбаева, К.Б. Асанов, А.А. Башев, Т.С. Джаксылыков, А.С. Марданов
Атырауский филиал ТОО «КМГ Инжиниринг», г. Атырау, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Обоснование. История проведения гидроразрыва пласта (далее – ГРП) на месторождениях Атырауского региона насчитывает более 20 лет, однако виды и функциональные характеристики проппанта, основного материала, используемого при ГРП, остаются неизменными. С учётом быстрого темпа технологического развития и растущей потребности в оптимизации процессов добычи, актуальность изучения новых видов проппантов становится очевидной. Возможность моделирования и адаптации высокотехнологичных проппантов под конкретные условия месторождений может стать ключом к увеличению эффективности ГРП и, как следствие, росту объёмов добычи углеводородов в Атырауском регионе.

Цель. В статье представлены последние достижения, мировые тенденции, опыт и лабораторные исследования, связанные с использованием инновационных проппантов, а также оценён потенциал применения облегчённых проппантов на месторождениях А и Б. Целью работы является изучение возможностей внедрения многофункциональных проппантов для оптимизации ГРП.

Материалы и методы. Для решения поставленной задачи была разработана модель геомеханических и фильтрационных характеристик пласта для месторождений А и Б с использованием специализированного программного обеспечения FiacPro, а также выполнена симуляция дизайна ГРП с различными параметрами закачки. На основе результатов моделирования ГРП с применением облегчённых проппантов произведён расчёт показателей добычи нефти.

Результаты. Результаты моделирования демонстрируют экономическую целесообразность использования облегчённых проппантов, о чём свидетельствует увеличение дополнительной добычи на месторождении А на 23,8%. Для месторождения Б прогнозируемый годовой объём добычи значительно превышает текущие показатели, что обеспечивает рост доходности в 4,5 раза.

Заключение. Многофункциональные проппанты обладают значительным потенциалом для повышения эффективности ГРП. Применение инновационных проппантов способствует улучшению контроля геометрии трещины, минимизируя риск прорыва в водонасыщенные зоны и увеличивая объём стимулируемой зоны, что позволяет оптимизировать добычу углеводородов.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, облегчённый проппант, фракции, покрытие, моделирование, трещина.

Как цитировать:

Бухарбаева А.Н., Асанов К.Б., Башев А.А., Джаксылыков Т.С., Марданов А.С. Перспективы повышения эффективности гидроразрыва пласта с использованием высокотехнологичных проппантов на месторождениях Атырауского региона // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2024. Том 6, №4. С. 49–67. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>.

UDC 622.276
CSCSTI 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>

Received: 20.08.2024.

Accepted: 11.12.2024.

Published: 31.12.2024.

Original article

Prospects for enhancing hydraulic fracturing efficiency through the use of advanced proppants in the Atyrau region fields

Aidana N. Bukharbayeva, Karim B. Assanov, Adilbek A. Bashev, Talgat S. Jaksylykov, Altynbek S. Mardanov

Atyrau branch of KMG Engineering, Atyrau, Kazakhstan

ABSTRACT

Background: The history of hydraulic fracturing in the Atyrau region's fields spans over 20 years; however, the types and functional characteristics of proppants – the main material used in HF – have remained unchanged. Given the rapid pace of technological advancement and the growing need to optimize production processes, the relevance of studying new types of proppants becomes obvious. The ability to model and customize high-tech proppants for the specific conditions of oil fields is crucial for enhancing hydraulic fracturing efficiency and, as a result, boosting hydrocarbon production volumes in the Atyrau region.

Aim: This article discusses recent advancements, global trends, practical experience, and laboratory studies related to the use of innovative proppants. It also evaluates the potential for utilizing lightweight proppants at fields A and B. The aim of this study is to explore the possibilities of deploying multifunctional proppants to optimize hydraulic fracturing operations.

Materials and Methods: To address the set objectives, we developed a model of the geomechanical and filtration properties of the formation for fields A and B using FracPro software. Also, we conducted a simulation of the hydraulic fracturing design with various injection parameters. Based on the results of hydraulic fracturing modeling results using lightweight proppants, we calculated indicators oil production.

Results: The simulation results demonstrate the economic feasibility of using lightweight proppants, evidenced by a 23.8% increase in additional production at Field A. For Field B, the estimated annual production volume significantly exceeds current levels, resulting in a 4.5-fold increase in profitability.

Conclusion: Multifunctional proppants hold considerable potential to enhance hydraulic fracturing efficiency. The application of innovative proppants allows for better control over fracture geometry, minimizes the risk of breakthrough into water-saturated zones, and increases the volume of stimulated zone, thereby optimizing hydrocarbon production.

Keywords: *hydraulic fracturing; lightweight proppant; fractions; coating; modeling; fracture.*

To cite this article:

Bukharbayeva AN, Assanov KB, Bashev AA, Jaksylykov TS, Mardanov AS. Prospects for enhancing hydraulic fracturing efficiency through the use of advanced proppants in the Atyrau region fields. *Kazakhstan journal for oil & gas industry*. 2024;6(4):49–67. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>.

ӨОЖ 622.276
FTAХР 52.47.27

DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>

Қабылданды: 20.08.2024.

Мақұлданды: 11.12.2024.

Жарияланды: 31.12.2024.

Түпнұсқа зерттеу

Атырау аймағындағы кен орындарында жоғары технологиялық проппанттарды пайдалану арқылы жерасты қабаттарын сұйықтықпен жару тиімділігін арттыру перспективалары

А.Н. Бұхарбаева, К.Б. Асанов, А.А. Башев, Т.С. Жақсылықов, А.С. Марданов
ҚМГ Инжиниринг Атыраулық филиалы, Атырау қаласы, Қазақстан

АННОТАЦИЯ

Негіздеу. Атырау аймағындағы кен орындарында қабатты сұйықтықпен жаруды (ҚСЖ) өткізу тарихы 20 жылдан астам уақытты қамтиды, бірақ ҚСЖ кезінде қолданылатын негізгі материал – проппанттың түрлері мен сипаттамалары осы уақытқа дейін көп өзгерген жоқ. Технологиялардың қарқынды дамуы және өндіріс процесін оңтайландыруға деген қажеттілік артуына байланысты, жаңа түрдегі проппанттарды зерттеу қажеттілігі айқын көрініп отыр. Жоғары технологиялық проппанттарды кен орындарының нақты жағдайына бейімдеп, оларды қолдану мүмкіндігі ҚСЖ тиімділігін арттырып, Атырау аймағында көмірсутектерді өндіру көлемін ұлғайтуға ықпал ете алады.

Мақсаты. Мақалада инновациялық проппанттарды қолданумен байланысты соңғы жетістіктер, әлемдік тенденциялар, тәжірибелер мен зертханалық зерттеулер, сондай-ақ А және В кен орындарында жеңілдетілген проппанттарды қолдану әлеуеті бағаланады. Жұмыстың мақсаты – ҚСЖ-ды оңтайландыру үшін көпфункционалды проппанттарды енгізу мүмкіндіктерін зерттеу.

Материалдар мен әдістер. Міндеттерді шешу үшін FracPro арнайы бағдарламалық жасақтамасын қолдана отырып, А және В кен орындарының геомеханикалық және сұзу сипаттамаларының моделі әзірленді, сондай-ақ түрлі айдау параметрлерімен ҚСЖ дизайнының симуляциясы жасалды. Жеңілдетілген проппанттар қолданылған ҚСЖ моделдеу нәтижелері негізінде мұнай өндіру көрсеткіштері есептелді.

Нәтижелері. Модельдеу нәтижелері жеңілдетілген проппанттарды пайдаланудың экономикалық тиімділігін көрсетіп, А кен орнында қосымша өндіріс көлемін 23,8%-ға арттыруды дәлелдеді. В кен орны үшін болжамды жылдық өндіру көлемі ағымдағы көрсеткіштерден едәуір асып түседі, бұл кірістіліктің 4,5 есе өсуін қамтамасыз етеді.

Қорытынды. Көпфункционалды проппанттар ҚСЖ тиімділігін арттыру үшін үлкен әлеуетке ие. Инновациялық проппанттарды пайдалану арқылы жарықшақ геометриясын бақылауды жақсартып, су қаныққан аймақтарға өну қаупін азайтуға және ынталандырылған аймақ көлемін арттыруға болады, бұл көмірсутектер өндіруді оңтайландыруға мүмкіндік береді.

Негізгі сөздер: қабатты сұйықтықпен жару, жеңілдетілген проппант, фракциялар, жабын, модельдеу, жарықшақтар.

Дәйексөз келтіру үшін:

Бұхарбаева А.Н., Асанов К.Б., Башев А.А., Жақсылықов Т.С., Марданов А.С. Атырау аймағындағы кен орындарында жоғары технологиялық проппанттарды пайдалану арқылы жерасты қабаттарын сұйықтықпен жару тиімділігін арттыру перспективалары. // Қазақстанның мұнай-газ саласының хабаршысы 2024. 6 том, №4. 49–67 б. DOI: <https://doi.org/10.54859/kjogi108775>.

Введение

ГРП является одним из основных инструментов повышения производительности скважин на месторождениях Атырауского региона. С каждым годом увеличиваются не только число операций ГРП, объёмы жидкостей и расклинивающего агента (проппанта), но и территориальный охват. Это связано с тем, что с момента внедрения технология достигла такого уровня по объёмам дополнительной добычи нефти, что, вероятно, уступает лишь бурению [1].

Постепенное увеличение количества объектов и месторождений, на которых внедряется технология ГРП, предопределяет работу с коллекторами различного геологического строения и свойств, а также работу с осложнениями. Следовательно, отличается и характер распространения трещин: в низкопроницаемых коллекторах формируется узкая и длинная трещина, а в высокопроницаемых коллекторах важнее добиться большой ширины [2]. Достижение целевой геометрии для эффективной работы трещины на практическом опыте обеспечивается путём изменения параметров закачки [3]. Однако последние исследования в данном направлении показывают, что и материалы, используемые в ходе ГРП, способны влиять на производительность скважины [4].

В рамках работ, выполняемых на месторождениях Атырауского региона, проппант рассматривается только как материал для закрепления трещин. Текущие условия проведения ГРП на месторождениях рассматриваемого региона (высокая обводнённость, близость водо- и газонефтяного контакта, низкий коэффициент извлечения нефти и пр.) обязывают его применять и в качестве материала для контроля производительности скважины. В рамках настоящей работы исследуются инновационные технологии и рассматриваются возможности применения многофункциональных проппантов на месторождениях Атырауского региона.

Материалы и методы

Для построения модели геомеханических и фильтрационных свойств пласта, проектирования операций ГРП используется программное обеспечение (далее – ПО) FracPro. Данное ПО включает обширную встроенную библиотеку жидкостей и проппантов, что позволяет использовать материалы из этой библиотеки для моделирования процессов гидроразрыва. FracPro предоставляет возможности для анализа распределения проппантов, улучшения проводимости и оценки характеристик трещин. В исследовании также применяются методы сбора и анализа производственных данных, полученных в результате проведённых операций ГРП на месторождениях Атырауского региона, что позволяет оценить эффективность

использованных технологий и выявить пути для оптимизации результатов ГРП.

Проппанты нового поколения

Увеличивающийся спрос на энергию и истощение традиционных залежей углеводородов (далее – УВ) вызвали интерес к расширению функциональности проппантов. Авторы [5] представляют обзор последних достижений в области технологии расклинивания. В статье рассматриваются различные типы многофункциональных проппантов, в т.ч. предназначенных для повышения проводимости, коррозионной стойкости и регулирования расхода. В статье [6] представлены результаты более чем 30 полевых испытаний с использованием многофункционального проппанта с покрытием, в т.ч. проведённых в нетрадиционных коллекторах, таких как сланцевые и плотные газовые пласты. К примеру, в карбонатном коллекторе в округе Гарфилд, штат Оклахома, использование многофункционального проппанта с покрытием привело к повышению добычи нефти на 43% по сравнению с традиционными проппантами. Далее представлены наиболее значимые разработки в области проппантов.

Проппант с модифицированным покрытием

За последние десятилетия предпринимались постоянные усилия по улучшению формы и механической прочности проппанта для обеспечения высокой проницаемости в трещине. Однако изучение поверхностных свойств проппантов, например, изменение их смачиваемости оставалось незначительно исследованным. Большинство обычных проппантов вступают в реакцию с водой и имеют угол смачивания менее 90° [7]. Это обеспечивает диспергирование жидкостей гидроразрыва на водной основе в трещине, в результате чего они застревают в поровых каналах проппантной пачки. Разработка проппантов с гидрофобным покрытием стала важной областью исследований в нефтегазовой промышленности. Основной целью этой разработки является создание расклинивающего материала, который устойчив к сохранению проводимости нефти в присутствии воды. Для достижения этой цели исследователи сосредоточились на изменении химического состава и морфологии поверхности обычных проппантов путём покрытия их тонким слоем гидрофобного материала. Гидрофобное покрытие может отталкивать воду и предотвращать её проникновение в трещину с проппантом, что позволяет уменьшить объёмы закупорки водой. Авторы [8] провели лабораторные исследования для изучения влияния смачивания поверхности керамических проппантов на характеристики потока нефти при различных условиях. Результаты этого исследования

свидетельствуют о том, что смачиваемость поверхности проппантов может оказывать значительное влияние на характеристики потока жидкости при ГРП. Гидрофильные керамические проппанты могут быть более эффективными в стимулировании потока жидкости и увеличении добычи УВ из пластов.

В работе [9] представлены лабораторные и полевые испытания проппанта с нейтральной смачиваемостью. Согласно проведённым исследованиям, нейтральная смачиваемость покрытия не способствует преимущественному захвату какой-либо жидкой фазы внутри трещины. Следовательно, потери давления из-за одновременного потока газа, нефти и воды уменьшены, что способствует улучшению относительной проницаемости нефти. Результаты полевых испытаний свидетельствуют об эффективности применения проппанта с покрытием: спустя год эксплуатации скважина, обработанная проппантом с покрытием, добыла на 13% больше газа и на 45% больше нефти по сравнению со скважиной с проппантом без покрытия (при идентичном дизайне ГРП).

Статья [10] описывает новый подход к модификации проппантов путём нанесения олеофобных компонентов на поверхность материала. В ходе лабораторных исследований доказано улучшение извлечения и текучести стимулирующих жидкостей за счёт устойчивости поверхности проппанта к воде и нефти: при поверхностной модификации проппанта было извлечено 90,4% нефти против 78,2%. Авторы обнаружили, что у проппантов с изменённой смачиваемостью угол контакта с водой должен быть близок к 90° , а не к 100° , чтобы обеспечить хорошие дисперсионные свойства в жидкости для ГРП без агрегации.

В работе [11] представлены результаты внедрения проппантов с нейтральной смачиваемостью на месторождения Мексиканского залива. Результаты показывают, что все стимулирующие жидкости, закачанные при ГРП, были извлечены в конце обработки, а также время освоения и получения первой добычи нефти сократилось на 43%.

В работе [7] изменили свойства традиционного проппанта: фенольные гидроксильные группы обычных песчаных проппантов, покрытых смолой, размером 40/70 меш¹ взаимодействовали с макромолекулярным модификатором для обеспечения нейтральной смачиваемости. Полевые испытания показали снижение производства воды на 40% в течение первых девяти месяцев.

Лабораторные исследования показали, что проппанты с водоотталкивающим покрытием обеспечивают улучшенную (на 16,71%) проводимость по сравнению с традиционными керамическими проппантами [12]. Проведённые

лабораторные исследования и полевые испытания показали, что применение гидрофобных и нейтральных покрытий проппанта представляет собой развивающееся направление для улучшения производительности скважин и сокращения расходов при ГРП.

Маркированный проппант

В настоящее время с помощью проппанта можно выполнить диагностику разрушения породы в процессе ГРП путём добавления «интеллекта» в расклинивающий агент [13]. Под «интеллектом» рассматривается покрытие проппанта, которое позволяет отслеживать перемещение материала внутри скважины и пласта. Определение интервалов, в которые поступает проппант, и точная оценка высоты трещины вблизи ствола скважины являются ценными данными при оптимизации стратегий стимулирования. Для оценки эффективности ГРП применяются радиоактивные индикаторы. В этом методе жидкость для ГРП и проппанты помечаются радиоактивными изотопами. Для определения высоты трещины регистрируется гамма-излучение с помощью гамма-спектро스코пии в интервале проведения ГРП [14]. Нерадиоактивные проппанты были разработаны в качестве альтернативы радиоактивным индикаторам с целью преодоления ограничений применения последних: (1) радиоизотопы имеют относительно короткий период полураспада, что требует проведения исследований вскоре после ГРП; (2) проблемы, связанные с обращением, транспортировкой, перекачкой и обратным потоком радиоактивных материалов, представляют менее экологичный и логистически неудобный метод; (3) существует риск радиоактивного загрязнения пластовых вод, обурования и скважинной площадки [15].

Статья [16] описывает результаты первых практических испытаний, проведённых с использованием маркированного проппанта, не содержащего радиоактивных элементов, для оптимизации ГРП в Алжире. Авторы сообщили, что применение технологии импульсного нейтронного каротажа позволяет определить геомеханические свойства ограничивающих слоёв сланца: напряжение смыкания и модуль Юнга тонких слоёв сланца над перфорированным интервалом были значительно увеличены по сравнению со значениями, использованными на этапе проектирования.

Производство нерадиоактивного проппанта имеет преимущества перед традиционным методом получения радиоактивных материалов. Маркирующий материал наносится на каждое зерно, обеспечивая обнаружение местоположения каждого проппанта. Нерадиоактивный маркер содержится в очень малых концентрациях в каждой грануле, что позволяет

¹ Меш – внесистемная единица измерения, равная количеству отверстий на один линейный дюйм.

избегать «ложноположительных» результатов, которые могут наблюдаться при использовании традиционной технологии, когда присутствие всего лишь нескольких высокорadioактивных частиц вблизи ствола скважины может неверно свидетельствовать о наличии значительной трещины [17].

Статья [18] представляет результаты исследований по оценке высоты трещин, образованных при проведении ГРП в Аргентине. В работе описываются методы определения высоты трещин: нерадиоактивный маркированный проппант, акустические исследования и технология микросейсмического мониторинга. Методы, применяемые в околоскважинной зоне, эффективно обнаруживают присутствие проппанта и изменения звуковых свойств породы из-за гидравлического воздействия, что позволяет оценить вертикальное распространение трещины. Микросейсмические данные показывают события для всех стадий, кроме стадии 1 (рис. 1). Распределение событий не соответствовало результатам, полученным с помощью других методов, и не отражало оценённый минимальный профиль напряжений. Авторы отмечают, что в рассматриваемых условиях микросейсмический мониторинг не является эффективным методом для оценки высоты трещины.

В статье [19] представлен метод оценки высоты гидравлических трещин на основе проппанта, смешанного с оксидом гадолиния (Gd_2O_3). Авторами также выявлены недостатки использования маркированного проппанта: методы, требующие проведения исследований до и после ГРП, чувствительны к газонасыщенности коллектора. Результаты экспериментов показали, что с изменением газонасыщенности тепловые нейтроны изменяются более интенсивно, чем гамма-излучение. Следовательно, когда газонасыщенность изменяется после проведения ГРП, методы нейтронного каротажа ограничены для оценки высоты трещины. Точная оценка высоты трещины вблизи ствола скважины имеет первостепенное значение как для анализа эффективности обработки, так и для прогнозирования эксплуатационных характеристик скважины.

Проппант с самозагеливающимся покрытием

Осаждение проппанта является распространённой проблемой, возникающей при проведении ГРП [20]. Все более актуальными становятся исследования, направленные на создание технологий поддержания проппанта во взвешенном состоянии. В качестве решения предложен метод получения проппантов с тонким покрытием, способный набухать при контакте с водой и образовывать рабочую жидкость, обеспечивающую необходимую песко-

несущую способность. Проппанты должны оставаться взвешенными в жидкости ГРП, чтобы гарантировать их эффективную транспортировку к трещине и желаемое размещение. Вязкость является важным параметром для транспортировки проппанта в гуаро-боратных системах, однако высокие концентрации полимера могут привести к загрязнению пласта, что значительно понижает проводимость трещины [21].

Концепция технологии самосuspendирующегося проппанта была впервые представлена в 2013 г. [22]. Исследователи предложили использовать проппанты с удельным весом, близким к удельному весу жидкости для ГРП, что позволяет проппанту оставаться взвешенным в жидкости без необходимости в гелеобразующих агентах. Авторы представили модифицированные проппанты, которые проявляют улучшенные транспортные свойства за счёт самосuspendирования в воде. Технология получения самосuspendирующегося проппанта включает нанесение тонкого слоя высокомолекулярного гидрогелевого полимера на поверхность проппанта. Авторы утверждают, что новый тип проппанта (далее – SSP) может привести к значительному увеличению эффективности ГРП.

В статье [23] отмечено, что самосuspendирующий проппант оказывает положительное влияние на длину, высоту трещины и плотность упаковки проппанта, таким образом увеличивая стимулируемый объём пласта. Также в статье представлены результаты эмпирического тестирования с использованием аппарата с горизонтальной ячейкой; исследования подтверждают теорию равномерного распределения проппанта по всей трещине (рис. 2, 3). Полевые испытания показали увеличение кумулятивной добычи нефти на 45% за 18 мес. в сравнении со скважиной, на которой был проведён традиционный ГРП. Авторы [24] представили механизм suspendирования проппанта, основанный на повышении вязкости рабочей жидкости при растворении покрытия проппанта. В ходе исследования подтверждено, что проппант полностью suspendировался за 120 сек, а осаждение не происходило ранее 200 мин (табл. 1). Согласно результатам полевых испытаний, использование самосuspendирующегося проппанта позволило сократить объём жидкости и время, необходимое для проведения ГРП.

Технология самосuspendирующегося проппанта стала многообещающим подходом к повышению эффективности операций ГРП. Данная технология обеспечивает равномерное распределение материалов по всему объёму трещины, снижает потребность в дополнительных добавках, которые могут быть дорогостоящими и потенциально вредными для окружающей

среды. Наконец, SSP уменьшает количество проппанта, необходимого для каждой операции ГРП, что может привести к значительной экономии средств.

Облегчённый проппант

Традиционные проппанты, изготовленные из таких материалов, как песок, керамика или бокситы, эффективны при создании и поддержании трещин, обеспечивая поступление УВ из пласта в ствол скважины. Однако высокая скорость оседания традиционных проппантов приводит к миграции частиц ко дну трещины, что является причиной снижения производительности скважин [25]. В связи с проблемой высокой скорости осаждения проппанта и ограничениями применения традиционных проппантов в глубоких скважинах возникла потребность в разработке более лёгких проппантов. Использование обычных проппантов меньшего размера не так эффективно в снижении скорости осаждения материала, как уменьшение удельного веса частиц [26]. Разработка проппанта исторически была направлена на повышение прочности, чтобы обеспечить возможность его применения в условиях повышенных нагрузок. Авторами [27] представлен облегчённый проппант с удельным весом 1,05, обладающий механическими свойствами, позволяющими успешно функционировать при давлении закрытия до 544 атм и пластовой температуре, превышающей 135°C. Применение облегчённых проппантов способствует более равномерному распределению и глубокому переносу проппанта, что приводит к увеличению площади закреплённой трещины. В работе [28] представлена статистика более 500 выполненных ГРП с использованием облегчённого проппанта, также при моделировании ГРП в сланцевом пласте получено увеличение добычи на 30% при использовании облегчённого проппанта.

Авторы [29] провели сравнение геометрии трещин при использовании ультралёгких (с удельным весом 1,25) и традиционных проппантов. Геометрия трещин для обеих скважин была определена на основе картирования с применением микросейсмической визуализации и сопоставления давлений с использованием 3D симулятора ГРП. В ходе исследования было выявлено, что применение ультралёгких проппантов способствует увеличению длины трещин в 1,5 раза и повышению их проводимости более чем в 6 раз (табл. 2).

В статье [30] представлена оптимальная комбинация облегчённого проппанта в сочетании с низковязкой жидкостью в условиях низкопроницаемого коллектора. Реализация предложенной технологии ГРП позволила уменьшить рост высоты трещины на 40–50% и увеличить полудлину трещины на 30–40%,

что привело к снижению обводнённости и увеличению совокупной добычи УВ.

На сегодняшний день существует три основных подхода к получению проппанта низкой плотности:

- первая стратегия заключается в создании пористой или пористой структуры для традиционного проппанта, что позволяет уменьшить кажущуюся плотность [5];

- второй подход включает органическое покрытие для традиционного проппанта, которое не только снижает плотность, но также улучшает механическую прочность, сферичность, гидрофобность и коррозионную стойкость материала [31];

- третий подход заключается в разработке проппанта с очень низкой плотностью с использованием органического полимера, при этом модификация с помощью неорганического наполнителя всегда необходима для улучшения механических и тепловых свойств [32].

Облегчённые проппанты имеют ряд преимуществ, что делает их привлекательными для применения в сложных геологических условиях. Тем не менее использование облегчённых проппантов связано с определёнными рисками и ограничениями, которые необходимо учитывать при их внедрении. Одним из основных ограничений облегчённых проппантов является их относительно низкая, по сравнению с традиционными керамическими проппантами, механическая прочность. Тем не менее благодаря инновационным технологиям удаётся решить вопрос сохранения механической прочности лёгких проппантов во времени. Авторы [33] представили новый вид сверхлёгкого проппанта – химически модифицированный и армированный композитный проппант, полученный из возобновляемых ресурсов. Авторы сообщают, что проппант обладает высокой стойкостью к раздавливанию и может выдерживать нагрузку более 400 атм без значительного разрушения. На рис. 4 представлена графика существующих облегчённых расклинивающих материалов. Проведённый литературный обзор демонстрирует широкий спектр условий их применения. Особый акцент сделан не только на улучшении транспортабельности проппанта за счёт снижения плотности, но и на повышении прочности материала с целью достижения наилучшего экономического эффекта.

В последние годы проппанты со сверхнизким весом рассматриваются как перспективное решение для повышения эффективности операций ГРП. Данный вид расклинивающего материала обладает рядом преимуществ:

- лёгкие проппанты обеспечивают улучшенную стимуляцию пласта за счёт создания более длинных и широких трещин. Меньшая плотность расклинивающего агента

обеспечивает лучшую транспортировку и распределение внутри трещин;

- в сравнении с традиционными проппантами, облегчённые проппанты имеют более низкую скорость оседания, что означает меньшую вероятность их уплотнения на дне трещины;
- облегчённые проппанты требуют более низкого давления закачки, что снижает потери, вызванные трением, во время операций ГРП. Это приводит к экономии энергии, снижению затрат и повышению общей эффективности.

Моделирование: перспективы применения многофункциональных проппантов на месторождениях Атырауского региона

Опыт проведения ГРП на месторождениях Атырауского региона показывает, что функциональность используемого проппанта ограничивается созданием и поддержанием проводимости трещины. При проведении ГРП использовались проппанты фракций 30/50, 20/40, 16/20 и 12/18 меш с максимальной концентрацией от 700 до 1300 кг/м³ (рис. 5). Также применялись комбинированные системы, состоящие из разных фракций проппанта. Опыт проведения ГРП на территории Атырауского региона свидетельствует о том, что комбинированные системы превосходят по эффективности использование проппанта одной фракции. В табл. 3 отражена общая статистика показателей эффективности проведённых ГРП с проппантами различных фракций.

На сегодняшний день зарубежный опыт доказывает возможность повышения эффективности ГРП с применением многофункциональных проппантов. Учитывая сложные геологические условия, постепенное ухудшение фонда скважин, рост обводнённости на месторождениях, актуализируется задача оптимизации ГРП. Авторами рассмотрены возможности улучшения эффективности ГРП на месторождениях А и Б путём моделирования с использованием облегчённых проппантов. На примере изменения плотности проппанта показаны методы увеличения дебита нефти после проведения ГРП:

- снижение доли воды в добываемой продукции в результате контроля вертикального роста трещины и увеличение притока нефти за счёт создания более длинной и проводящей трещины;
- повышение объёма закрепленной трещины при закачке идентичной массы проппанта.

Месторождение А: ограничение высоты и увеличение длины трещины с применением облегчённых проппантов

В тектоническом отношении месторождение А расположено в юго-восточной части

Прикаспийской впадины, продуктивные горизонты приурочены к среднеюрским отложениям. По всем продуктивным пластам структура имеет идентичное строение в форме антиклинальной складки, не осложнённой никакими нарушениями. Литологически разрез представлен переслаиванием песчано-глинистых отложений с включениями бурого угля. В целом нефть продуктивных горизонтов характеризуется как лёгкая с вязкостью 1,4 МПа·с. По результатам гидродинамических исследований, коллекторы горизонта Ю-II характеризуются низкой проницаемостью (в среднем 0,087 мкм²). Месторождение находится на поздней стадии разработки, при этом эксплуатация осуществляется с поддержанием пластового давления посредством внутриконтурного заводнения; текущее пластовое давление оценивается на уровне 14 МПа.

На месторождении А с 2018 г. проводятся геолого-технические мероприятия с применением ГРП. В качестве объекта для проведения был выбран горизонт Ю-II. При выполнении работ не выявлено технологических отклонений, плановый объём проппанта был полностью размещён. Однако по результатам анализа эффективности за скользящий год с момента запуска скважин после ГРП, средний прирост дебита нефти составил всего 2,3 т/сут, и только одна скважина из восьми является успешной с приростом в 5,2 т/сут. Основным фактором недостижения плановых показателей является рост обводнённости после проведения работ по ГРП. Причиной увеличения обводнённости на данном месторождении могут являться прорывы трещин ГРП в близкорасположенный водонефтяной контакт. Подбор технологий по ограничению вертикального роста трещины является актуальной проблемой для месторождения А.

На скв. 1 ГРП проведен 01.06.2022 г., закачено 7 т керамического проппанта фракций 16/20 и 12/18 меш с плотностью 2,88 и 2,85 г/см³ соответственно. Получен отрицательный эффект в виде двукратного увеличения обводнённости с 41% до 90% (рис. 6). Причиной увеличения обводнённости скважины является прорыв трещины в водонасыщенные пропластки, расположенные в кровельной части целевой зоны (рис. 7, а). При планировании работ по ГРП на скв. 1 с целью минимизации риска прорыва было принято решение об ограничении тоннажа до 7 т. Однако проведение малотоннажного ГРП не обеспечило достижения поставленной цели.

Применение облегчённых проппантов в комбинации с низковязкой жидкостью предложено в качестве решения задачи контроля высоты трещины ГРП. Использование низковязких жидкостей направлено на получение большей полудлины трещины и на недопущение приобщения водонасыщенных пропластков; в свою очередь, применение облегчённого

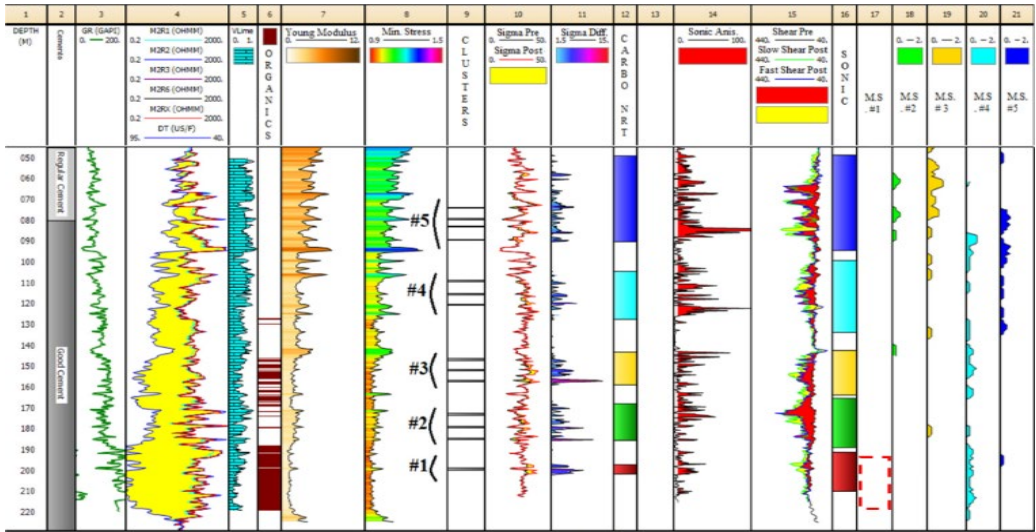


Рисунок 1. Результаты исследования высоты трещин ГРП [18]
Figure 1. Results of the study of the height of hydraulic fractures



Рисунок 2. Тестирование потока пропанта: кварцевый песок [23]
Figure 2. Proppant flow testing: silica sand [23]

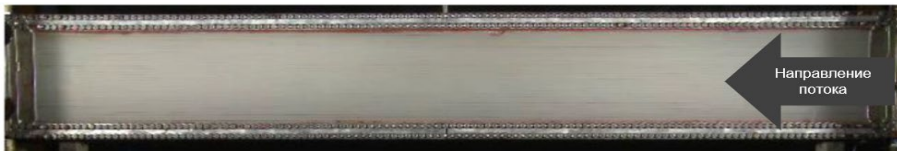


Рисунок 3. Тестирование потока пропанта: самосuspendирующий пропант [23]
Figure 3. Proppant flow testing: self-suspending proppant [23]

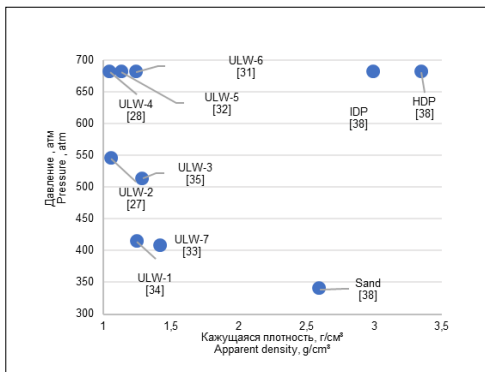


Рисунок 4. Сравнение плотности расклинивающего материала [27–28, 34–38]
Figure 4. Comparison of propping material density [27–28, 34–38]

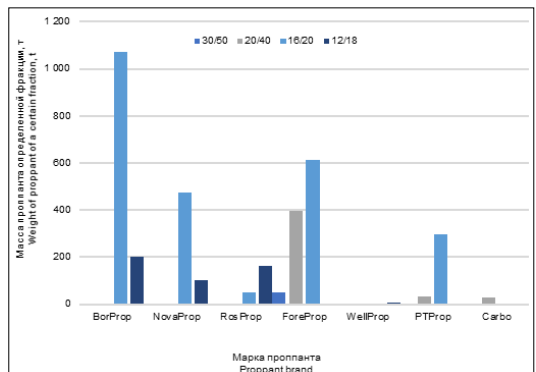


Рисунок 5. Распределение используемых пропантов по фракциям и производителям
Figure 5. Distribution of proppant by fractions and manufacturers

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований [24]
Table 1. Results of laboratory tests [24]

| Соотношение песка, % Sand ratio | Время / Time | | | |
|---------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|
| | при 80°C / at 80°C | | при 150°C / at 150 °C | |
| | сuspендиpования, сек suspending, sec | осаждения, мин sedimentation, min | сuspендиpования, сек suspending, sec | осаждения, мин sedimentation, min |
| 10 | 55 | 56 | 77 | 36 |
| 20 | 41 | 109 | 55 | 85 |
| 30 | 24 | 277 | 39 | 254 |
| 40 | 13 | 384 | 25 | 334 |

Таблица 2. Сравнение геометрии трещины ГРП [29]
Table 2. Comparison of hydraulic fracture geometry [29]

| Сравнение геометрии трещины ГРП Comparison of hydraulic fracture geometry | | Облегчённый проппант / Lightweight proppant | | Традиционный проппант / Conventional proppant | |
|--|------------------------|--|--|--|--|
| | | симулятор ГРП HF simulator | микросейсмическая визуализация microseismic visualization | симулятор ГРП HF simulator | микросейсмическая визуализация microseismic visualization |
| Clearfork | длина, м length, m | 364,5 | 320,0 | 180,4 | 198,1 |
| | высота, м height, m | 98,8 | 91,4 | 107,9 | 106,7 |
| Glorietta | длина, м length, m | 338,9 | 289,6 | 223,1 | 182,9 |
| | высота, м height, m | 117,3 | 121,9 | 45,4 | 61,0 |

Таблица 3. Показатели эффективности ГРП при использовании
одного типа фракции и комбинированных систем
Table 3. Hydraulic fracturing efficiency indicators when using a single fraction type
and combined systems

| Система фракций Fraction system | Кол-во ГРП Number of HF | Эффективность, % Efficiency, % | Прирост успешных скважин, т/сут Increase in successful wells, tons per day | Прирост неуспешных скважин, т/сут Increase in unsuccessful wells, tons per day |
|---|----------------------------|-----------------------------------|---|---|
| Комбинированная система фракций Combined system | 48 | 60,4 | 15,6 | 1,2 |
| Один тип фракций One fraction type | 44 | 45,5 | 14,2 | 0,9 |

Таблица 4. Сравнение геометрии трещины ГРП
Table 4. Comparison of hydraulic fracture geometry

| Параметры геометрии трещины ГРП HF geometry parameter | Традиционный проппант Conventional proppant | | Облегчённый проппант Lghhtweight proppant |
|--|--|---------------------------------------|--|
| | дизайн design | факт. показатели actual indicators | дизайн design |
| Полудлина, м Fracture half-length, m | 32,0 | 30,0 | 42,0 |
| Высота, м Height, m | 31,0 | 26,0 | 16,0 |
| Средняя ширина трещины, мм Average fracture width, mm | 2,1 | 3,1 | 5,6 |
| Вертикальная глубина до верхней границы трещины, м Vertical depth to the upper fracture boundary, m | 1370,0 | 1372,0 | 1376,0 |
| Вертикальная глубина до нижней границы трещины, м Vertical depth to the lower fracture boundary, m | 1401,0 | 1397,0 | 1392,0 |
| Безразмерная проводимость Dimensionless fracture conductivity | 0,8 | 3,1 | 10,9 |

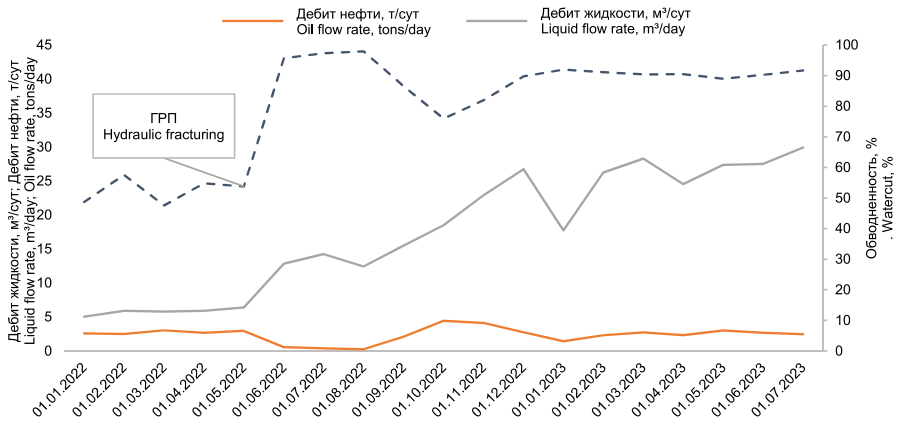


Рисунок 6. Динамика показателей добычи после проведения ГРП на скв. 1
Figure 6. Production dynamics after hydraulic fracturing at Well No. 1

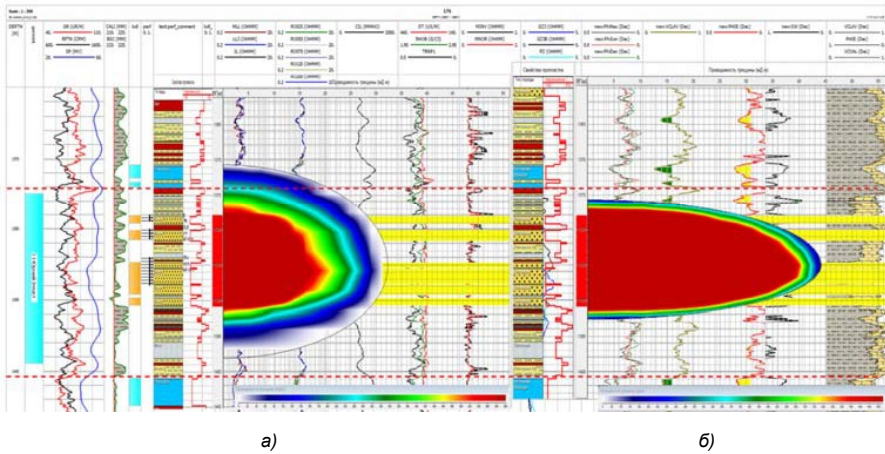


Рисунок 7. Профили трещин ГРП на скв. 1
Figure 7. Hydraulic fracture profiles of Well No. 1

а) по модели фактической проведенной операции / for a model on the actual operation performed; б) по модели с облегченным проппантом / for a model with lightweight proppant

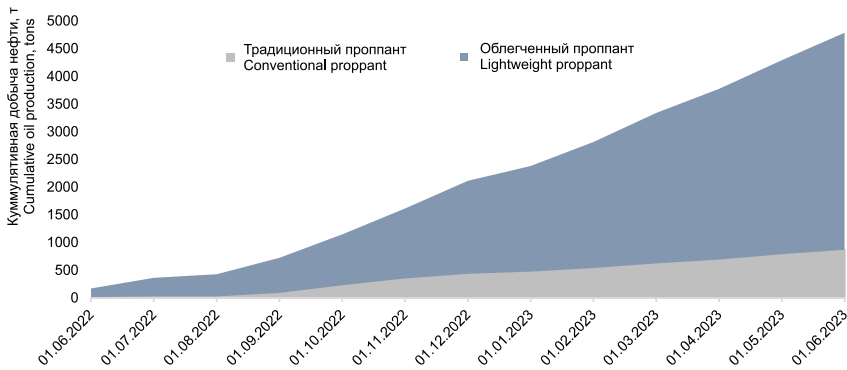


Рисунок 8. Сравнение фактической и прогнозной добычи нефти
Figure 8. Comparison of actual and estimated oil production

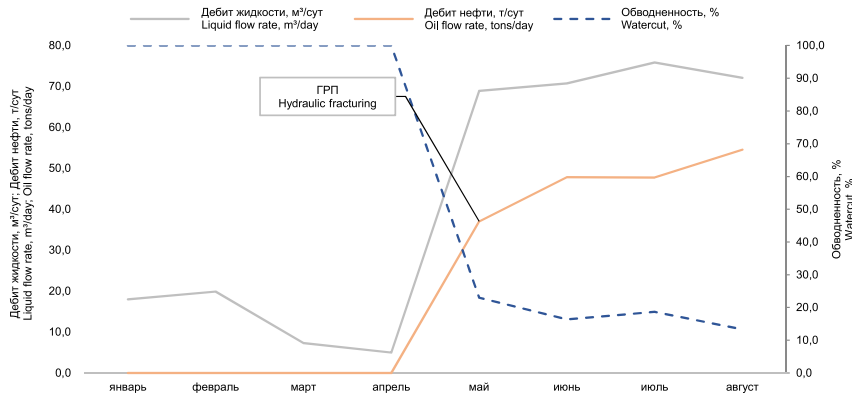


Рисунок 9. Динамика показателей добычи после проведения ГРП на скв. 2
Figure 9. Production dynamics after hydraulic fracturing at Well No.2

Таблица 5. Сравнение геометрии трещины ГРП
Table 5. Comparison of hydraulic fracture geometry

| Параметры геометрии трещины ГРП HF geometry parameter | Традиционный проппант Conventional proppant | | Облегченный проппант Lightweight proppant |
|--|--|---------------------------------------|--|
| | дизайн design | факт. показатели actual indicators | дизайн design |
| Полудлина, м Fracture half-length, m | 64,0 | 58,0 | 89,0 |
| Высота, м Height, m | 41,0 | 48,0 | 61,0 |
| Средняя ширина трещины, мм Average fracture width, mm | 6,7 | 6,1 | 4,3 |
| Вертикальная глубина до верхней границы трещины, м Vertical depth to the upper fracture boundary, m | 2288,0 | 2281,0 | 2 280 |
| Вертикальная глубина до нижней границы трещины, м Vertical depth to the lower fracture boundary, m | 2330,0 | 2329,0 | 2 341 |
| Безразмерная проводимость Dimensionless fracture conductivity | 4,2 | 4,9 | 2,4 |

Таблица 6. Сравнение стоимости работ по ГРП
Table 6. Comparison of the cost of HF

| Статья затрат при проведении ГРП Cost item of hydraulic fracturing | Скв. 1 Well No.2 | Скв. 2 Well No.2 | Проппант Proppant | |
|---|------------------------|---------------------|-------------------------------------|----------------------------|
| | количество quantity | | традиционный conventional | облегченный lightweight |
| Ставка подготовки скважины, скв.-опер. Well preparation rate, well-operation | 1,0 | 1,0 | Фиксированная сумма Fixed amount | |
| Освоение скважины, скв.-опер. Well development, well-operation | 1,0 | 1,0 | Фиксированная сумма Fixed amount | |
| Сервисная ставка ГРП, опер. Service rate of hydraulic fracturing, well-operation | 1,0 | 1,0 | Фиксированная сумма Fixed amount | |
| Материалы для ГРП, в т.ч.: Materials for hydraulic fracturing, incl.: | | | | |
| проппант, т proppant | 50,0 | 7,0 | X | 1,25X |
| линейная жидкость ГРП, м³ hydraulic fracturing fluid, m³ | 34,0 | 22,7 | Фиксированная сумма Fixed amount | |
| сшитая жидкость ГРП, м³ crosslinked fluid, m³ | 121,0 | 28,3 | Фиксированная сумма Fixed amount | |
| мобилизация ГРП, скв.-опер. hydraulic fracturing mobilization, well-operation | 2,0 | 2,0 | Фиксированная сумма Fixed amount | |

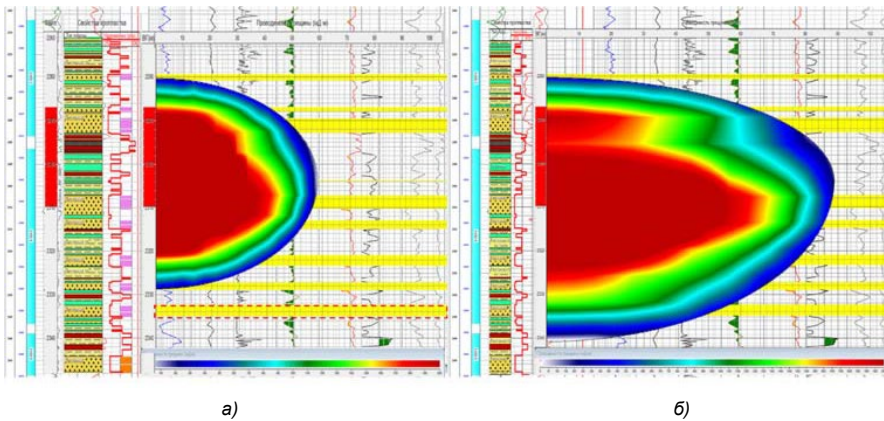


Рисунок 10. Профили трещин ГРП на скв. 2
Figure 10. Hydraulic fracture profiles at Well No.2

а) по модели фактической проведённой операции / for a model on the actual operation performed; б) по модели с облегчённым проппантом / for a model with lightweight proppant

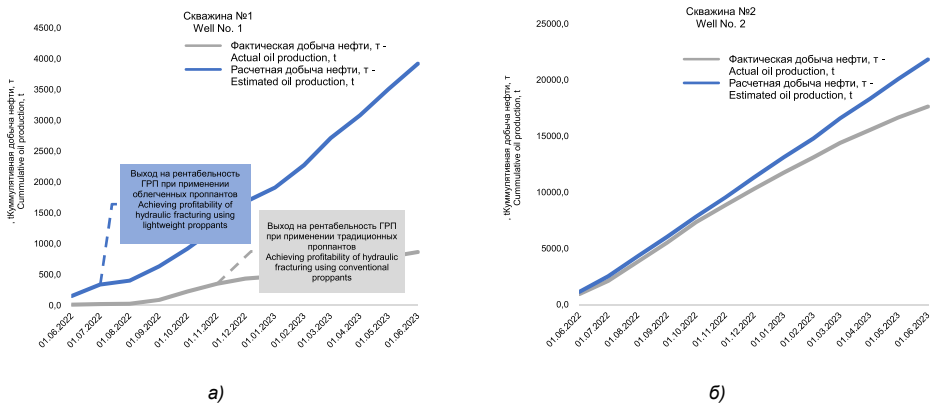


Рисунок 11. Сравнение фактической и расчётной кумулятивной добычи
Figure 11. Comparison of actual and estimated cumulative production

а) скв. 1 / Well No. 1; б) скв. 2 / Well No. 2

проппанта исключает его осаждение и обеспечивает лучшие показатели проводимости трещины. В ПО FracPro построена модель геомеханических и фильтрационных свойств пласта с планируемым размещением трещины в интервалах горизонта Ю-II для скв. 1. Для оценки моделирования распространения трещины ГРП по высоте и латерали спроектирован аналогичный фактически проведённый на скв. 1 дизайн ГРП.

В моделировании использовалась жидкость разрыва WG-35 на водной основе и облегчённый проппант фракций 16/20 и 12/18 с плотностью 1,2 и 1,4 г/см³ соответственно. Данные системной библиотеки проппантов и жидкостей в ПО FracPro позволяют установить соответствие параметров используемых материалов пластовым условиям рассматриваемого месторождения. На рис. 7 (б) представлен профиль трещины ГРП по модели с применением облегчённого проппанта. Сог-

ласно результатам моделирования, применение проппанта с низкой плотностью позволило избежать прорыва в водонасыщенные пропластки с увеличением эффективной полудлины трещины. Параметры геометрии смоделированной трещины представлены в табл. 4. Интервал охвата трещины ГРП составил 1376–1392 м, закреплённая проппантом высота трещины уменьшилась на 10 м, полуудлина увеличилась практически в полтора раза – с 30 до 42 м, при этом ширина трещины увеличилась в 1,8 раз. В результате проводимость трещины ГРП с применением облегчённого проппанта оказалась на порядок выше, что оказывает положительное влияние на дебит нефти.

Эффективность применения метода ГРП на скв. 1 месторождения А доказывает фактический прирост дебита жидкости с 6 до 22 м³/сут (рис. 8). Однако, как упоминалось ранее, прорыв в водонасыщенные пропластки

является причиной текущей высокой доли воды в добываемой продукции. Используя результаты моделирования, проведен расчёт дебита нефти. Данная методология основана на расчёте коэффициента продуктивности скважины в зависимости от изменения фильтрационного

$$q = \frac{k \cdot h}{18,41 \cdot \mu \cdot \beta} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\left(\ln \frac{R_e}{R_w} - 0,75 + S\right)} = \frac{k \cdot h}{18,41 \cdot \mu \cdot \beta} \cdot \frac{P_2 - P_1}{\left(\ln \frac{R_e}{R_w} + (P_D - \ln \frac{R_2}{R_w})\right)} \quad (1)$$

где q – дебит скважины, т/сут; k – проницаемость пласта, мД; h – эффективная мощность, м; μ – вязкость нефти, сПз; β – объёмный коэффициент нефти, м³/м³; P_2 – пластовое давление, атм; P_1 – забойное давление, атм; R_e – радиус дренирования, м; R_w – радиус ствола скважины, м; S – фильтрационное сопротивление; P_D – безразмерное давление, определяемое по корреляционной зависимости безразмерного времени и проводимости трещины, которые, в свою очередь, рассчитываются в зависимости от параметров трещины, полученных в результате моделирования.

По результатам расчёта, прогнозный дебит по нефти составляет 10,2 т/сут. При сохранении показателя обводнённости на уровне 50% и текущих значениях дебита жидкости прогнозная кумулятивная добыча нефти за год достигнет 3920,9 т нефти (рис. 9), что сопоставимо с рассчитанным дебитом нефти на основе моделирования.

Месторождение Б: повышение стимулируемого объёма трещины при закачке идентичной массы проппанта

В тектоническом отношении месторождение приурочено к Прорвинской зоне поднятий. На месторождении выявлены нефтяные горизонты, приуроченные к песчано-глинистым отложениям верхней и средней юры. Нефть месторождения классифицируется как лёгкая, с вязкостью 0,9 мПа*с. Рассматриваемые горизонты характеризуются хорошими фильтрационно-ёмкостными свойствами: пористость объекта составляет 20%, проницаемость – 0,189 мкм². Значительного снижения пластового давления на месторождении не наблюдается, энергетическое состояние остаётся стабильным. Текущее пластовое давление для данного горизонта составляет 20,3 МПа.

Впервые ГРП на месторождении Б проведён в августе 2022 г., на текущий момент успешно выполнены две работы по ГРП, средний прирост дебита нефти составляет 30 т/сут. В условиях месторождения А задача оптимизации ГРП состояла в ограничении вертикального роста трещины – минимизации риска прорыва вверх и вниз. В данном случае применение лёгких проппантов направлено на повышение

сопротивления призабойной зоны пласта. Для расчёта прогнозного дебита используется информация о пласте и скважине, а также результаты моделирования, а именно: параметры геометрии, суммарной проводимости и давления трещины (1):

стимулируемого объёма закреплённой трещины, что позволит добиться большего дополнительного объёма добычи нефти. На примере скв. 2 месторождения Б рассмотрено повышение продуктивности при применении облегчённых проппантов с закачкой идентичной массы, как и в ходе ранее проведённой обработки.

Скв. 2 переведена из нижележащего горизонта, ГРП проведён 23.05.2023 г., закачано 50 т керамического проппанта фракций 16/20 и 12/18 меш с плотностью 2,8 г/см³. Основной ГРП выполнен успешно, с размещением запланированного объёма проппанта. Пусковой дебит нефти составил 37 т/сут, накопленная добыча после проведения ГРП 3883 т. По состоянию на 01.09.2023 г., учитывая фактическое время работы в 79 сут, проведение ГРП на скв. 2 является экономически рентабельным. Однако согласно данным проведённой операции, трещина ГРП не охватывает все продуктивные пропластки целевой зоны. В данном случае необходимо увеличение эффективной площади разрыва. Как правило, данная задача решается за счёт проведения более крупных обработок, что приводит к дополнительным расходам на выполнение ГРП. Для увеличения стимулируемого объёма закреплённой трещины на скв. 2 рассмотрено применение лёгких проппантов аналогичной массы. Улучшенная транспортабельность облегчённых проппантов позволяет распределять их по гораздо большей части создаваемой зоны разрыва.

В ПО FracPro построена модель геомеханических и фильтрационных свойств пласта для скв. 2 месторождения Б. Спроектирован аналогичный фактически проведённому дизайн ГРП при замене традиционного проппанта облегчённым: закачка 50 т проппанта фракций 16/20 и 12/18 меш с плотностью 1,2 и 1,4 г/см³ соответственно и максимальной концентрацией 1200 кг/м³. На рис. 10 (б) представлен профиль трещины ГРП по модели с применением облегчённого проппанта.

Согласно результатам моделирования, при применении проппанта с более низкой плотностью интервал охвата трещины ГРП составил 2280–2341 м, что позволило включить продуктивный пропласток на глубину 2332,5–2335 м в обработку (рис. 10). Помимо этого, изменение скорости осаждения проп-

панта способствовало увеличению эффективной полудлины трещины на 50%. Сравнение геометрии трещины при применении традиционного и облегчённого проппанта при одинаковых параметрах графика закачки представлено в табл. 5.

По результатам моделирования дебит нефти при использовании облегчённых проппантов был рассчитан согласно уравнению (1). Прогнозный дебит по нефти составляет 57,6 т/сут, что превышает осреднённый фактический дебит на 10,8 т/сут. Такие факторы, как приобщение нижнего продуктивного интервала, равномерное распределение проводимости трещины и увеличение закреплённой проппантом длины трещины способствовали росту показателей добычи нефти.

Экономическое обоснование применения облегчённых проппантов

Применение облегчённых проппантов направлено на повышение рентабельности операций гидроразрыва, что обеспечивает устойчивое наращивание добычи. Экономическая эффективность ГРП выражается в расчёте прибыли от дополнительной добычи нефти, при этом учитываются статьи затрат на подготовительные работы и проведение ГРП (табл. 6). Как было указано выше, моделирование осуществлялось в соответствии с графиком закачки ранее выполненного ГРП на скв. 1 и 2. Таким образом, единственным изменяемым параметром является стоимость проппанта пониженной плотности. Основываясь на рыночном анализе, стоимость лёгкого проппанта на 10–25% выше стоимости традиционного.

По грубой экономической оценке (без учёта затрат на сбор и транспортировку нефти, условно-переменных и условно-постоянных расходов на обслуживание скважин, налогов), а также при условии реализации нефти по 60 \$/bbl и обменном курсе 460 тенге за доллар США использование облегчённого проппанта на скв. 2 позволит увеличить доход от дополнительной добычи за скользящий год на 23,8%. Прогнозируемая годовая добыча для скв. 1 значительно превышает фактические показатели, что обеспечивает рост доходности в 4,5 раза. Таким образом, применение облегчённых проппантов, безусловно, экономически рентабельно с более ранним сроком окупаемости проведения ГРП (рис. 11).

Обсуждение

В данной статье проведён всесторонний анализ современных технологий применения проппантов с оценкой их преимуществ и недостатков. Особое внимание уделено проппантам с модифицированным покрытием,

маркированным проппантам, самозагеливающимся и облегчённым проппантам. Авторами также проанализированы результаты операций гидроразрыва пласта, выполненных на 179 скв. месторождений Атырауского региона. Преимущественно использовались проппанты фракций 30/50, 20/40, 16/20 и 12/18 меш с концентрацией от 700 до 1300 кг/м³. Комбинированные системы проппантов из различных фракций продемонстрировали более высокую эффективность по сравнению с однородными системами. Проведённое моделирование ГРП с применением облегчённых проппантов на двух месторождениях А и Б, имеющих осложнённые условия для гидроразрыва, показало, что использование облегчённых проппантов способствует эффективному контролю геометрии трещины, снижению риска прорыва в водонасыщенные зоны и увеличению объёма стимулируемой трещины.

Заключение

Данное исследование посвящено изучению потенциала применения многофункциональных проппантов в качестве инструмента оптимизации ГРП на месторождениях Атырауского региона. В ходе работы проведено и установлено:

- анализ результатов ГРП, проведённого на 179 скважинах, показал, что функциональные возможности используемых проппантов ограничиваются выполнением требований по закрытию трещин и регулированию проводимости;
- проведён литературный обзор существующих проппантов. Лабораторные исследования и практический опыт применения проппантов нового поколения показали их многофункциональность и эффективность;
- моделирование ГРП с применением проппантов низкой плотности было проведено на примере месторождений А и Б. Результаты моделирования показали, что изменение типа расклинивающего материала возможно использовать для контроля геометрии трещины;
- выполнен расчёт прогнозных дебитов нефти после проведения ГРП с применением облегчённых проппантов, результаты которого продемонстрировали повышение эксплуатационных характеристик скважин;
- расчёт экономической эффективности ГРП с применением облегчённых проппантов, несмотря на их более высокую стоимость, показывает конкурентоспособность и более раннюю окупаемость проведённой обработки за счёт увеличения приростов дебитов нефти, что в свою очередь достигается путём увеличения длины трещин, сокращения высоты и ограничения водопритока, а также увеличения проводимости и общего объёма трещин ГРП.

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 существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Бухарбаева А.Н. – сбор и анализ данных, проведение исследования, написание статьи; Асанов К.Б. – концепция работы, корректировка направления при проведении исследования; Башев А.А. – редактирование рукописи, предоставление консультаций; Джаксылыков Т.С. – формирование методики, проверка результатов; Марданов А.С. – контроль за выполнением работы.

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: Aidana N. Bukharbayeva – collecting and analyzing data, conducting the study, writing the article; Karim B. Assanov – conceptualization of the study, adjusting the direction when conducting the study; Adilbek A. Bashev – editing the manuscript, providing consultations; Talgat S. Jaksylykov – formulating the methodology, verifying the results; Altynbek S. Mardanov – supervision over the implementation of the study.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith M., Montgomery C.* Hydraulic Fracturing. Boca Raton : CRC Press, 2015.
2. *Economides M., Oligney R., Valkó P.* Unified Fracture Design. Alvin : Orsa Press, 2004.
3. *Kun A., Longchen D., Gao H., Guangliang J.* Hydraulic Fracturing Treatment Optimization for Low Permeability Reservoirs Based on Unified Fracture Design // *Energies*. 2018. Vol. 11, N 7. P. 12–23. doi: [10.3390/en11071720](https://doi.org/10.3390/en11071720).
4. *Al-Muntasheri G.* A Critical Review of Hydraulic-Fracturing Fluids for Moderate to Ultralow-Permeability Formations Over the Last Decade // *SPE Prod & Oper*. 2014. Vol. 29, N 04. P. 243–260. doi: [10.2118/169552-PA](https://doi.org/10.2118/169552-PA).
5. *Danso D.K., Negash B.M., Ahmed T.Y., et al.* Recent Advances in Multifunctional Proppant Technology and Increased Well Output with Micro and Nano Proppants // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 196. doi: [10.1016/j.petrol.2020.108026](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108026).
6. *Radwan A.* A Multifunctional Coated Proppant: A Review of Over 30 Field Trials in Low Permeability Formations // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*; Oct 9–11, 2017; San Antonio, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/17ATCE/2-17ATCE/193346>. Дата обращения: 12.07.2024.
7. *Green J., Dewendt A., Terracina J., Abrams B.* First Proppant Designed to Decrease Water Production // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*; Sept 24–26, 2018; Dallas, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/18ATCE/3-18ATCE/D032S061R003/214394>. Дата обращения: 15.07.2024.
8. *Dong K., He W., Wang M.* Effect of surface wettability of ceramic proppant on oil flow performance in hydraulic fractures // *Energy Science and Engineering*. 2018. Vol. 7, Issue 2. P. 504–514. doi: [10.1002/ese3.297](https://doi.org/10.1002/ese3.297).
9. *Palisch T., Chapman M., Leasure J.* Novel Proppant Surface Treatment Yields Enhanced Multiphase Flow Performance and Improved Hydraulic Fracture Clean-up // *SPE Liquids-Rich Basins Conference*; Sept 2–3, 2015; Midland, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPELRBC/proceedings-abstract/15LRBC/1-15LRBC/D012S009R003/184841>. Дата обращения: 18.07.2024.
10. *Bestaoui-Spurr N., Sun S., Williams V., et al.* Using Properties in Nature to Modify Proppant Surfaces and Increase Flow // *SPE International Conference on Oilfield Chemistry*/Montgomery; Apr 3–5, 2017; Montgomery, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-abstract/17OCC/2-17OCC/D021S007R005/195566>. Дата обращения: 20.07.2024.
11. *Bestaoui-Spurr N., Stanley D., Williams V., et al.* Optimizing Proppant Surface Properties to Improve Formation Flow in Offshore Frac-Packs // *Offshore Technology Conference*; May 1–4, 2017; Houston, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/17OTC/2-17OTC/D021S017R001/93802>. Дата обращения: 20.07.2024.
12. *Fan F., Li F.-X., Tian S.-C., et al.* Hydrophobic epoxy resin coated proppants with ultra-high self-suspension ability and enhanced liquid conductivity // *Petroleum Science*. 2021. Vol. 18, Issue 6. P. 1753–1759. doi: [10.1016/j.petsci.2021.09.004](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.004).
13. *Saldungaray P., Palisch T., Leasure J.* Can Proppants Do More Than Hold The Fracture Open? // *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition*; Apr 21–23, 2015; Al-Khobar, Saudi Arabia. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATS/proceedings-abstract/15SATS/All-15SATS/SPE-177978-MS/196745>. Дата обращения: 25.07.2024.
14. *Gadeke L.L., Smith H.D.* Tracerscan: A Spectroscopy Technique For Determining The Distribution Of Multiple Radioactive Tracers In Downhole Operations // *The Log Analysts*. 1987. Vol. 28, N 1.
15. *Duenckel R.J., Smith H.D., Warren W.A., Abram D.G.* Field Application of a New Proppant Detection Technology // *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*; Oct 30 – Nov 2, 2011; Denver, Colorado, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/11ATCE/All-11ATCE/SPE-146744-MS/148522>. Дата обращения: 26.07.2024.

16. Forno L., Latronico R., Saldungaray P., et al. Non-Radioactive Detectable Proppant First Applications in Algeria for Hydraulic Fracturing Treatments Optimization // SPE North Africa Technical Conference and Exhibition; Sept 14–16, 2015; Cairo, Egypt. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPENATC/proceedings-abstract/15NATC/3-15NATC/D031S022R001/183604?redirectedFrom=PDF>. Дата обращения: 26.07.2024.
17. Grae A.D., Duenckel R.J., Nelson J.R. Field Study Compares Fracture Diagnostic Technologies // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; Feb 6–8, 2012; The Woodlands, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/12HFTC/All-12HFTC/SPE-152169-MS/159703>. Дата обращения: 27.07.2024.
18. Ortiz A.C., Hryb D.E., Martínez J.R., Varela R.A. Hydraulic Fracture Height Estimation in an Unconventional Vertical Well in the Vaca Muerta Formation Neuquen Basin, Argentina // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; Feb 9–11, 2016; The Woodlands, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/16HFTC/2-16HFTC/D021S006R006/187052>. Дата обращения: 30.07.2024.
19. Liu J., Zhang F., Gardner R.B., et al. A method to evaluate hydraulic fracture using proppant detection // Applied Radiation and Isotopes. 2015. Vol. 105. P. 139–143. doi: [10.1016/j.apradiso.2015.08.003](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.003).
20. Yao S., Chang C., Hai K., et al. A review of experimental studies on the proppant settling in hydraulic fractures // Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 208, Part B. doi: [10.1016/j.petrol.2021.109211](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109211).
21. Churakov A.V., Pichugin M.N., Fayzulin I.G., et al. Non-Guar Synthetic Hydraulic Fracturing Gels – Successful Concept of Choice // SPE Russian Petroleum Technology Conference; Oct 26–29, 2020; Virtual. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/20RPTC/3-20RPTC/D033S010R005/450136?redirectedFrom=PDF>. Дата обращения: 31.07.2024.
22. Mahoney R.P., Soane D., Kincaid K.P., et al. Self-Suspending Proppant // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; Feb 4–6, 2013; Woodlands, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/13HFTC/2-13HFTC/D021S005R007/173751?redirectedFrom=PDF>. Дата обращения: 31.07.2024.
23. Goldstein B., VanZeeland A. Self-Suspending Proppant Transport Technology Increases Stimulated Reservoir Volume and Reduces Proppant Pack and Formation Damage // SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Sept 28–30, 2015; Houston, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/15ATCE/1-15ATCE/180321>. Дата обращения: 01.08.2024.
24. Cao W., Xie K., Lu X., et al. Self-suspending proppant manufacturing method and its property evaluation // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 192. doi: [10.1016/j.petrol.2020.107251](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107251).
25. Isah A., Hiba M., Al-Azani Kh., et al. A comprehensive review of proppant transport in fractured reservoirs: Experimental, numerical, and field aspects // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2021. Vol. 88. doi: [10.1016/j.jngse.2021.103832](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103832).
26. Brannon H.D., Starks T.R. II. Maximizing Return on Fracturing Investment by Using Ultra-Lightweight Proppants to Optimize Effective Fracture Area: Can Less Really Deliver More? // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; Jan 19–21, 2009; Woodlands, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/09HFTC/All-09HFTC/SPE-119385-MS/147598?redirectedFrom=PDF>. Дата обращения: 01.08.2024.
27. Bestaoui-Spurr N., Hudson H. Ultra-Light Weight Proppant and Pumping Design Lead to Greater Conductive Fracture Area in Unconventional Reservoirs // SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition; Apr 4–6, 2017; Mumbai, India. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEOGIC/proceedings-abstract/17OGIC/2-17OGIC/D021S009R003/197639>. Дата обращения: 02.08.2024.
28. Han J., Pirogov A., Li Ch., et al. Maximizing Productivity with Ultra-Lightweight Proppant in Unconventional Wells: Simulations and Field Cases // SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference; Aug 24–26, 2016; Beijing, China. Режим доступа: <https://onepetro.org/speaphf/proceedings-abstract/16APHF/2-16APHF/D022S010R048/185197>. Дата обращения: 02.08.2024.
29. Chambers R., Meise K. Comparison of Fracture Geometries Utilizing Ultralightweight Proppants Provide Evidence That Partial Monolayers Can Be Created: A Case History // SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Oct 9–12, 2005; Dallas, Texas, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/05ATCE/05ATCE/SPE-96818-MS/89316>. Дата обращения: 03.08.2024.
30. Pavlova S., Detkovich M., Loginov A., et al. Successful Implementation of Light Weight Proppant for Stimulation of Tight Sandstones in Russia on Vinogradova Oilfield // SPE Russian Petroleum Technology Conference; Oct 22–24, 2019; Moscow, Russia. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/19RPTC/3-19RPTC/D033S020R004/219302>. Дата обращения: 06.08.2024.
31. Liang F., Sayed M., Al-Muntasher G., et al. A comprehensive review on proppant technologies // Petroleum. 2016. Vol. 2, Issue 1. P. 26–39. doi: [10.1016/j.petm.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.petm.2015.11.001).
32. Chen T., Gao J., Zhao Y., et al. Progress of Polymer Application in Coated Proppant and Ultra-Low Density Proppant // Polymers. 2022. Vol. 14, N 24. doi: [10.3390/polym14245534](https://doi.org/10.3390/polym14245534).
33. Zoveidavianpoor M., Gharibi A., Zaidi bin Jaafar M. Experimental characterization of a new high-strength ultra-lightweight composite proppant derived from renewable resources // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 170. P. 1038–1047. doi: [10.1016/j.petrol.2018.06.030](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.030).
34. Rickards A.R., Brannon H.D., Wood W.D., Stephenson C.J. Ultra-Lightweight Proppant Development Yields Exciting New Opportunities in Hydraulic Fracturing Design // SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Oct 5–8, 2003; Denver, Colorado, USA. Режим доступа: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/03ATCE/03ATCE/SPE-84308-MS/137740>. Дата обращения: 08.08.2024.
35. Sun W.-Y., Yao X. Performance of resin coated unburned ultra-low density fracturing proppant // Bulletin of the Chinese ceramic society. 2015. Vol. 34, N 10. doi: [10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2015.10.030](https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2015.10.030). (In Chinese).
36. Chen T., Wang Y., Yan C., Wang H. Preparation of heat resisting poly (methyl methacrylate)/silica fume composite microspheres used as ultra-lightweight proppants // Micro & Nano Letters. 2014. Vol. 9, Issue 11. P. 757–828. doi: [10.1049/mnl.2014.0486](https://doi.org/10.1049/mnl.2014.0486).
37. Liang T., Yan C., Zhou S., et al. Carbon black reinforced PMMA-based composite particles: preparation, characterization, and application // Journal of Geophysics and Engineering. 2017. Vol. 14, Issue 5. P. 1225–1232. doi: [10.1088/1742-2140/aa6e7e](https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa6e7e).
38. McDaniel G., Abbott J., Mueller F., et al. Changing the Shape of Fracturing: New Proppant Improves Fracture Conductivity // SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Sept 19–22, 2012; Florence, Italy. Режим доступа:

<https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/10ATCE/All-10ATCE/SPE-135360-MS/102149>. Дата обращения: 16.08.2024.

REFERENCES

1. Smith M, Montgomery C. *Hydraulic Fracturing*. Boca Raton: CRC Press; 2015.
2. Economides M, Oligney R, Valkó P. *Unified Fracture Design*. Alvin: Orsa Press; 2004.
3. Kun A, Longchen D, Gao H, Guangliang J. Hydraulic Fracturing Treatment Optimization for Low Permeability Reservoirs Based on Unified Fracture Design. *Energies*. 2018;11(7):12–23. doi: [10.3390/en11071720](https://doi.org/10.3390/en11071720).
4. Al-Muntasher G. A Critical Review of Hydraulic-Fracturing Fluids for Moderate to Ultralow-Permeability Formations Over the Last Decade. *SPE Prod & Oper*. 2014;29(04):243–260. doi: [10.2118/169552-PA](https://doi.org/10.2118/169552-PA).
5. Danso DK, Negash BM, Ahmed TY, et al. Recent Advances in Multifunctional Proppant Technology and Increased Well Output with Micro and Nano Proppants. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;196:108026. doi: [10.1016/j.petrol.2020.108026](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108026).
6. Radwan A. A Multifunctional Coated Proppant: A Review of Over 30 Field Trials in Low Permeability Formations. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2017 Oct 9–11; San Antonio, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/17ATCE/2-17ATCE/193346>.
7. Green J, Dewendt A, Terracina J, Abrams B. First Proppant Designed to Decrease Water Production. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2018 Sept 24–26; Dallas, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/18ATCE/3-18ATCE/D032S061R003/214394>.
8. Dong K, He W, Wang M. Effect of surface wettability of ceramic proppant on oil flow performance in hydraulic fractures. *Energy Science and Engineering*. 2018;7(2):504–514. doi: [10.1002/ese3.297](https://doi.org/10.1002/ese3.297).
9. Palisch T, Chapman M, Leasure J. Novel Proppant Surface Treatment Yields Enhanced Multiphase Flow Performance and Improved Hydraulic Fracture Clean-up. SPE Liquids-Rich Basins Conference; 2015 Sept 2–3; Midland, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPELRBC/proceedings-abstract/15LRBC/1-15LRBC/D012S009R003/184841>.
10. Bestaoui-Spurr N, Sun S, Williams V, et al. Using Properties in Nature to Modify Proppant Surfaces and Increase Flow. SPE International Conference on Oilfield Chemistry/Montgomery; 2017 Apr 3–5; Montgomery, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEOCC/proceedings-abstract/17OCC/2-17OCC/D021S007R005/195566>.
11. Bestaoui-Spurr N, Stanley D, Williams V, et al. Optimizing Proppant Surface Properties to Improve Formation Flow in Offshore Frac-Packs // Offshore Technology Conference; 2017 May 1–4; Houston, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/OTCONF/proceedings-abstract/17OTC/2-17OTC/D021S017R001/93802>.
12. Fan F, Li F-X, Tian S-C, et al. Hydrophobic epoxy resin coated proppants with ultra-high self-suspension ability and enhanced liquid conductivity. *Petroleum Science*. 2021;18(6):1753–1759. doi: [10.1016/j.petsci.2021.09.004](https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.004).
13. Saldungaray P, Palisch T, Leasure J. Can Proppants Do More Than Hold The Fracture Open? SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition; 2015 Apr 21–23; Al-Khobar, Saudi Arabia. Available from: <https://onepetro.org/SPEASATS/proceedings-abstract/15SATS/All-15SATS/SPE-177978-MS/196745>.
14. Gadekea LL, Smith HD. Trancerscan: A Spectroscopy Technique For Determining The Distribution Of Multiple Radioactive Tracers In Downhole Operations. *The Log Analysts*. 1987;28(1).
15. Duenckel RJ, Smith HD, Warren WA, Abram DG. Field Application of a New Proppant Detection Technology // SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2011 Oct 30 – Nov 2; Denver, Colorado, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/11ATCE/All-11ATCE/SPE-146744-MS/148522>.
16. Forno L, Latronico R, Saldungaray P, et al. Non-Radioactive Detectable Proppant First Applications in Algeria for Hydraulic Fracturing Treatments Optimization // SPE North Africa Technical Conference and Exhibition; 2015 Sept 14–16; Cairo, Egypt. Available from: <https://onepetro.org/SPENATC/proceedings-abstract/15NATC/3-15NATC/D031S022R001/183604?redirectedFrom=PDF>.
17. Grae AD, Duenckel RJ, Nelson JR. Field Study Compares Fracture Diagnostic Technologies // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; 2012 Feb 6–8; The Woodlands, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/12HFTC/All-12HFTC/SPE-152169-MS/159703>.
18. Ortiz AC, Hryb DE, Martínez JR, Varela RA. Hydraulic Fracture Height Estimation in an Unconventional Vertical Well in the Vaca Muerta Formation Neuquen Basin, Argentina. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; February 9–11, 2016; The Woodlands, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/16HFTC/2-16HFTC/D021S006R006/187052>.
19. Liu J, Zhang F, Gardner RB, et al. A method to evaluate hydraulic fracture using proppant detection. *Applied Radiation and Isotopes*. 2015;105:139–143. doi: [10.1016/j.apradiso.2015.08.003](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.003).
20. Yao S, Chang C, Hai K, et al. A review of experimental studies on the proppant settling in hydraulic fractures. *Petroleum Science and Engineering*. 2021;208(B):109211. doi: [10.1016/j.petrol.2021.109211](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109211).
21. Churakov AV, Pichugin MN, Fayzulin IG, et al. Non-Guar Synthetic Hydraulic Fracturing Gels – Successful Concept of Choice. SPE Russian Petroleum Technology Conference; 2020 Oct 26–29; Virtual. Available from: <https://onepetro.org/SPERTC/proceedings-abstract/20RPTC/3-20RPTC/D033S010R005/450136?redirectedFrom=PDF>.
22. Mahoney RP, Soane D, Kincaid KP, et al. Self-Suspending Proppant. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference; 2013 Feb 4–6; Woodlands, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/13HFTC/2-13HFTC/D021S005R007/173751?redirectedFrom=PDF>.
23. Goldstein B, VanZeeland A. Self-Suspending Proppant Transport Technology Increases Stimulated Reservoir Volume and Reduces Proppant Pack and Formation Damage. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2015 Sept 28–30; Houston, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/15ATCE/1-15ATCE/180321>.
24. Cao W, Xie K, Lu X, et al. Self-suspending proppant manufacturing method and its property evaluation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020;192:107251. doi: [10.1016/j.petrol.2020.107251](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107251).
25. Isah A, Hiba M, Al-Azani K, et al. A comprehensive review of proppant transport in fractured reservoirs: Experimental, numerical, and field aspects. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2021;88:103832. doi: [10.1016/j.jngse.2021.103832](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103832).
26. Brannon HD, Starks TR II. Maximizing Return on Fracturing Investment by Using Ultra-Lightweight Proppants to Optimize Effective Fracture Area: Can Less Really Deliver More? SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference;

- 2009 Jan 19–21; Woodlands, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEHFTC/proceedings-abstract/09HFTC/All-09HFTC/SPE-119385-MS/147598?redirectedFrom=PDF>.
27. Bestaoui-Spurr N, Hudson H. Ultra-Light Weight Proppant and Pumping Design Lead to Greater Conductive Fracture Area in Unconventional Reservoirs. SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition; 2017 Apr 4–6; Mumbai, India. Available from: <https://onepetro.org/SPEOGIC/proceedings-abstract/17OGIC/2-17OGIC/D021S009R003/197639>.
28. Han J, Pirogov A, Li C, et al. Maximizing Productivity with Ultra-Lightweight Proppant in Unconventional Wells: Simulations and Field Cases. SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference; 2016 Aug 24–26; Beijing, China. Available from: <https://onepetro.org/speaphf/proceedings-abstract/16APHF/2-16APHF/D022S010R048/185197>.
29. Chambers R, Meise K. Comparison of Fracture Geometries Utilizing Ultralightweight Proppants Provide Evidence That Partial Monolayers Can Be Created: A Case History. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2005 Oct 9–12; Dallas, Texas, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/05ATCE/05ATCE/SPE-96818-MS/89316>.
30. Pavlova S, Demkovich M, Loginov A et al. Successful Implementation of Light Weight Proppant for Stimulation of Tight Sandstones in Russia on Vinogradova Oilfield. SPE Russian Petroleum Technology Conference; 2019 Oct 22–24; Moscow, Russia. Available from: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/19RPTC/3-19RPTC/D033S020R004/219302>.
31. Liang F, Sayed M, Al-Muntasheri G, et al. A comprehensive review on proppant technologies. *Petroleum*. 2016;2(1):26–39. doi: [10.1016/j.petlm.2015.11.001](https://doi.org/10.1016/j.petlm.2015.11.001).
32. Chen T, Gao J, Zhao Y, et al. Progress of Polymer Application in Coated Proppant and Ultra-Low Density Proppant. *Polymers*. 2022;14(24):5534. doi: [10.3390/polym14245534](https://doi.org/10.3390/polym14245534).
33. Zoveidavianpoor M, Gharibi A, Zaidi bin Jaafar M. Experimental characterization of a new high-strength ultra-lightweight composite proppant derived from renewable resources. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;170:1038–1047. doi: [10.1016/j.petrol.2018.06.030](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.06.030).
34. Rickards AR, Brannon HD, Wood WD, Stephenson CJ. Ultra-Lightweight Proppant Development Yields Exciting New Opportunities in Hydraulic Fracturing Design. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2003 Oct 5–8; Denver, Colorado, USA. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/03ATCE/03ATCE/SPE-84308-MS/137740>.
35. Sun W-Y, Yao X. Performance of resin coated unburned ultra-low density fracturing proppant. *Bulletin of the Chinese ceramic society*. 2015;34(10):2900–4. doi: [10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2015.10.030](https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2015.10.030). (In Chinese).
36. Chen T, Wang Y, Yan C, Wang H. Preparation of heat resisting poly (methyl methacrylate)/silica fume composite microspheres used as ultra-lightweight proppants. *Micro & Nano Letters*. 2014;9(11):757–828. doi: [10.1049/mnl.2014.0486](https://doi.org/10.1049/mnl.2014.0486).
37. Liang T, Yan C, Zhou S, et al. Carbon black reinforced PMMA-based composite particles: preparation, characterization, and application. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2017;14(5):1225–1232. doi: [10.1088/1742-2140/aa6e7e](https://doi.org/10.1088/1742-2140/aa6e7e).
38. McDaniel G, Abbott J, Mueller F, et al. Changing the Shape of Fracturing: New Proppant Improves Fracture Conductivity. SPE Annual Technical Conference and Exhibition; 2012 Sept 19–22; Florence, Italy. Available from: <https://onepetro.org/SPEATCE/proceedings-abstract/10ATCE/All-10ATCE/SPE-135360-MS/102149>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

***Бухарбаева Айдана Нурлановна**

ORCID [0009-0001-3861-7888](https://orcid.org/0009-0001-3861-7888)

e-mail: a.bukharbayeva@kmge.kz.

Асанов Карим Балхашевич

ORCID [0009-0002-1005-6959](https://orcid.org/0009-0002-1005-6959)

e-mail: k.asanov@kmge.kz.

Башев Адилбек Айткалиевич

ORCID [0009-0009-7050-7249](https://orcid.org/0009-0009-7050-7249)

e-mail: a.bashev@kmge.kz.

Джаксылыков Талгат Сайнович

ORCID [0000-0002-1530-3974](https://orcid.org/0000-0002-1530-3974)

e-mail: t.jaxylykov@kmge.kz.

Марданов Алтынбек Сүлейменұлы

ORCID [0000-0002-8342-3046](https://orcid.org/0000-0002-8342-3046)

e-mail: a.mardanov@kmge.kz.

AUTHORS' INFO

***Aidana N. Bukharbayeva**

ORCID [0009-0001-3861-7888](https://orcid.org/0009-0001-3861-7888)

e-mail: a.bukharbayeva@kmge.kz.

Karim B. Assanov

ORCID [0009-0002-1005-6959](https://orcid.org/0009-0002-1005-6959)

e-mail: k.asanov@kmge.kz.

Adilbek A. Bashev

ORCID [0009-0009-7050-7249](https://orcid.org/0009-0009-7050-7249)

e-mail: a.bashev@kmge.kz.

Talgat S. Jaksylykov

ORCID [0000-0002-1530-3974](https://orcid.org/0000-0002-1530-3974)

e-mail: t.jaxylykov@kmge.kz.

Altynbek S. Mardanov

ORCID [0000-0002-8342-3046](https://orcid.org/0000-0002-8342-3046)

e-mail: a.mardanov@kmge.kz.

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding Author