ISSN 2712-8008
Том / Volume 25 №4 2025
Домашняя страница журнала: https://ered.pstu.ru/index.php/geo
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

УДК 622.276.66
Статья / Article
© ПНИПУ / PNRPU, 2025

Комплексный анализ технологий контроля высоты трещин гидравлического разрыва пласта

Р.Р. Сахибгараев[1], И.Н. Бабичев[1], Р.Р. Степанова[2], З.А. Гарифуллина[2], И.Г. Фаттахов[3]

[1]ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423450, Альметьевск, ул. Ленина, 75а)
[2]ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»
(Российская Федерация, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1)
[3]Институт «ТатНИПИнефть» ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина (Российская Федерация, 423462, г. Альметьевск, ул. Советская, 168а)

A Comprehensive Analysis of Fracture Height Control Technologies during Hydraulic Fracturing

Ramis R. Sakhibgaraev[1], Igor N. Babichev[1], Razifa R. Stepanova[2], Zulfiya A. Garifullina[2], Irik G. Fattakhov[3]

[1]PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (75a Lenina st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation)
[3]FSBEI HE "Ufa State Petroleum Technological University" (1 Kosmonavtov st., Ufa, 450064, Russian Federation)
[3]TatNIPIneft R&D Institute of the PJSC TATNEFT named after V.D. Shashin (186a Sovetskaya st., Almetyevsk, 423462, Russian Federation)

Получена / Received: 02.06.2025. Принята / Accepted: 31.10.2025. Опубликована / Published: 21.11.2025

Ключевые слова:
гидравлический разрыв пласта (ГРП), контроль высоты трещины, трудноизвлекаемые запасы, маловязкие жидкости ГРП, высоковязкие жидкости ГРП, жидкости ГРП на основе ПАВ, жидкости ГРП на основе ПАА, пенные жидкости ГРП.

В современных условиях нефтегазодобычи наблюдается устойчивая тенденция увеличения доли трудноизвлекаемых запасов при одновременном росте обводненности добываемой продукции. Данный тренд характеризуется существенным снижением темпов роста извлекаемых запасов и объемов скважин, соответствующих критериям применимости традиционных технологий гидравлического разрыва пласта (ГРП). В этих условиях критически важным становится выбор оптимальной технологии ГРП, которая обеспечит максимальную эффективность при минимальных рисках осложнений.
Существующие традиционные технологии ГРП, основанные на применении гелеобразующих гуаровых систем, характеризуются высокой вязкостью жидкостей, которая оказывает значительное влияние на развитие высоты трещины. В условиях сложного геологического строения месторождений, где продуктивные нефтенасыщенные пласты и нижележащие водонасыщенные пласты разделены тонкими глинистыми перемычками, это приводит к неконтролируемому прорыву трещины ГРП по вертикали. Попытки снизить вязкость традиционных жидкостей разрыва путем изменения загрузки гелеобразователя сопряжены с риском потери песконесущей способности и возникновения осложнений в виде преждевременной остановки закачки.
Данная работа посвящена комплексному анализу альтернативных технологий ГРП, направленных на решение проблемы неконтролируемого вертикального распространения трещины. Рассматриваемые инновационные технологии основаны на регулировании вязкости жидкости разрыва с целью снижения давления в формируемой трещине. Особое внимание уделяется современным методам контроля геометрии трещины, позволяющим достигать оптимального соотношения между ее высотой и длиной при сохранении необходимых фильтрационных характеристик трещины. Данный подход способствует эффективному подключению в работу ранее не вовлеченных в разработку запасов углеводородов и существенно снижает риски преждевременного обводнения добываемой продукции.
В работе представлен комплексный анализ преимуществ и недостатков рассмотренных технологий с учетом их применимости в различных геолого-технических условиях. На основании проведенного исследования предложен оптимальный вариант технологии контроля высоты трещины ГРП, обеспечивающий максимальную эффективность при минимальных экономических и технологических рисках.
Результаты проведенного исследования имеют важное практическое значение для повышения эффективности ГРП в осложненных геологических условиях и могут служить основой для разработки рекомендаций по оптимизации параметров процесса ГРП при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти. Внедрение предложенных технологических решений позволит существенно расширить границы применимости метода ГРП и повысить коэффициент извлечения нефти на месторождениях со сложным геологическим строением.

Keywords:
hydraulic fracturing, fracture height control, unconventional reserves, low-viscosity HF fluids, high-viscosity HF fluids, surfactant-based HF fluids, polyacrylonitrile-based HF fluids, foam HF fluids.

In today's oil and gas production environment, there is a steady increase in the share of unconventional reserves, accompanied by a simultaneous increase in water cut. This trend is characterized by a significant decline in the growth rate of recoverable reserves and well volumes that meet the applicability criteria of traditional hydraulic fracturing (HF) technologies. Under these conditions, selecting the optimal HF technology to ensure maximum efficiency while minimizing the risk of complications becomes critical.
Existing traditional HF technologies based on the use of gelling guar systems are characterized by high fluid viscosity, which significantly impacts fracture height development. In complex geological conditions, where productive oil-saturated formations and underlying water-saturated formations are separated by thin clay barriers, this leads to uncontrolled vertical fracture breakthrough. Attempts to reduce the viscosity of traditional fracturing fluids by varying the gelling agent loading are associated with the risk of losing sand-carrying capacity and complications such as premature pumping shutdown.
This paper presents a comprehensive analysis of alternative HF technologies aimed at addressing the problem of uncontrolled vertical fracture propagation. These innovative technologies are based on regulating the viscosity of the fracturing fluid to reduce pressure within the fracture. Particular attention is paid to modern methods of fracture geometry control, which enable the optimal ratio between fracture height and length to be achieved while maintaining the required fracture filtration characteristics. This approach facilitates the efficient development of previously undeveloped hydrocarbon reserves and significantly reduces the risk of premature water cuts.
The paper also presents a comprehensive analysis of the advantages and disadvantages of the technologies considered, taking into account their applicability in various geological and technical conditions. Based on the conducted research, an optimal hydraulic fracture height control technology has been proposed, ensuring maximum efficiency with minimal economic and technological risks.
The results of the study have important practical implications for improving HF efficiency in complex geological conditions and can serve as the basis for developing recommendations for optimizing HF parameters during the development of unconventional oil reserves. Implementation of the proposed technological solutions will significantly expand the applicability of the HF method and increase oil recovery at fields with complex geological structures.

Сахибгараев Рамис Расилевич – главный специалист по проектированию (тел.: +007 (904) 460 81 73).
Бабичев Игорь Николаевич – начальник отдела подземного ремонта скважин (e-mail: bin_oprs@tatneft.ru, тел.: +007 (855) 330 70 05).
Степанова Разифа Раисовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент (e-mail: Razifa0210@ya.ru, тел.: +007 (927) 337 19 40).
Гарифуллина Зульфия Асгатовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент (e-mail: Gza96@ya.ru, тел.: +007 (927) 440 13 47).
Фаттахов Ирик Галиханович – доктор технических наук, доцент, директор по повышению нефтеотдачи (e-mail: fattakhovig@tatneft.ru, тел.: +007 (855) 331 08 00,). Контактное лицо для переписки.

Ramis R. Sakhibgaraev (Author ID in Scopus: 56800851200, ORCID: 0009-0000-3130-8268) – Chief Specialist for design (tel.: +7 (904) 460 81 73).
Igor N. Babichev (ORCID: 0009-0007-0332-4296) – Head of the Underground Well Repair Department (tel.: +7 (855) 330 70 05, e-mail: bin_oprs@tatneft.ru).
Razifa R. Stepanova (Author ID in Scopus: 57201779369) – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor (tel.: +7 (927) 337 19 40, e-mail: Razifa0210@ya.ru).
Zulfiya A. Garifullina (Author ID in Scopus: 57210323001, ORCID: 0009-0003-2065-2129) – PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor (tel.: +7 (927) 440 13 47, e-mail: Gza96@ya.ru).
Irik G. Fattakhov (Author ID in Scopus: 48560997700, ORCID: 0000-0002-3086-4323) – Doctor in Engineering, Associate Professor, Director of Enhanced Oil Recovery, Wave and Biotechnology (tel.: +7 (855) 331 08 00, e-mail: fattakhovig@tatneft.ru). The contact person for correspondence.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Сахибгараев, Р.Р. Комплексный анализ технологий контроля высоты трещин гидравлического разрыва пласта / Р.Р. Сахибгараев, И.Н. Бабичев, И.Г. Фаттахов // Недропользование. – 2025. – Т.25, №4. – С. 374–381. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.12

Please cite this article in English as:
Sakhibgaraev R.R., Babichev I.N., Stepanova R.R., Garifullina Z.A., Fattakhov I.G. A Comprehensive Analysis of Fracture Height Control Technologies during Hydraulic Fracturing. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2025, vol.25, no.4, pp. 374-381. DOI: 10.15593/2712-8008/2025.4.12

Введение

В последние десятилетия наблюдается значительный рост доли трудноизвлекаемых запасов нефти, что обусловлено истощением традиционных запасов и увеличением потребности в углеводородах. Бурение скважин в сложных геологических условиях становится все более актуальным, так как многие из оставшихся запасов относятся к категории трудноизвлекаемых. Переход месторождений на четвертую стадию разработки, характеризующуюся ростом уровня обводненности, также требует применения инновационных технологий для повышения нефтеотдачи.

Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих справиться с этими вызовами, является гидравлический разрыв пласта (ГРП) – технология, широко применяемая в нефтегазовой отрасли для увеличения продуктивности скважин. Процесс заключается в создании трещин в горных породах с помощью высокого давления нагнетания жидкости с последующим закреплением трещины пропантом, что позволяет значительно повысить приток углеводородов к скважине из удаленных зон пласта [1, 2].

Одним из ключевых аспектов успешного проведения ГРП является контроль высоты трещины, который позволяет оптимизировать процесс и минимизировать риски прорыва трещины в нижележащие водонасыщенные пласты. Контроль высоты трещины включает в себя мониторинг и управление параметрами, такими как давление, фракция пропанта, объем и тип закачиваемой жидкости [3]. Эти свойства влияют на поток в трещине и стволе скважины, утечки в пласте и на способность переносить песок, которые играют важную роль в определении геометрии трещины и размещения пропанта. Жидкости с более низкой вязкостью (например, жидкость на основе ПАВ) имеют тенденцию создавать более длинные, тонкие и менее закрепленные трещины. Жидкости с более высокой вязкостью или более высокой сжимаемостью (например, пена N_2 и сшитый гель) имеют тенденцию создавать более короткие, более широкие и лучше закрепленные трещины. Жидкости с низкой вязкостью и более высокой сжимаемостью (CO_2) снижают давление разрыва из-за более выраженных эффектов утечки. Скважины, обработанные CO_2, показывают более высокую добычу углеводородов и более низкую добычу воды из-за снижения вязкости, расширения объема и улучшенной относительной проницаемости нефти.

Влияние реологических свойств жидкости ГРП на геометрию трещины

Реологические свойства жидкостей, используемых для разрыва, играют ключевую роль в процессе ГРП. Вязкость жидкости определяет несколько критически важных аспектов:

1. Геометрические характеристики трещины. Вязкость напрямую влияет на соотношение длины и ширины формирующихся трещин. В общем случае при увеличении вязкости наблюдается тенденция к образованию коротких, но более широких трещин. При этом ширина трещины должна быть достаточной для успешного размещения и транспортировки пропанта.

2. Эффективность переноса пропанта. Вязкость жидкости также определяет ее способность удерживать пропант во взвешенном состоянии и переносить его на большие расстояния внутри трещины. При высокой вязкости пропант может находиться в жидкости дольше, что увеличивает его мобильность и распределение.

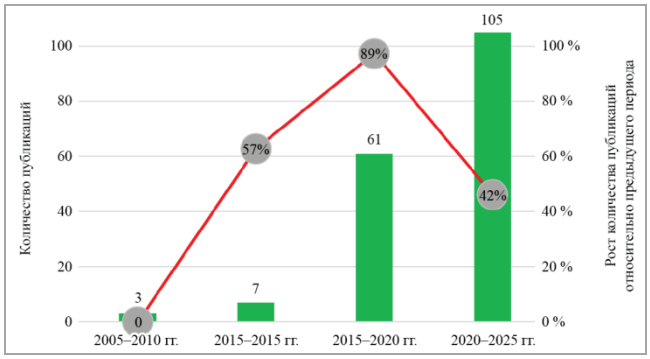


Рис. 1. Статистика публикаций по теме «Использование низковязких жидкостей при производстве ГРП»

3. Давление на устье скважины. С увеличением вязкости жидкости возрастают потери на трение в трубопроводах, что приводит к повышению давления на устье скважины во время закачки. Для работы с высоковязкими жидкостями необходимо использовать насосные комплекты и трубы больших диаметров (например, 89 мм в нашем случае).

Для достижения оптимальных условий эксплуатации скважины с использованием пропантного ГРП безразмерная проводимость трещины, обозначаемая как C_{fD}, должна стремиться к оптимальному значению [4]:

$$C_{fD} = \frac{k_f w}{k x_f} \approx 1{,}6, \quad (1)$$

где x_f – полудлина трещины; k_f – проницаемость пропанта; k – проницаемость породы; w – средняя ширина трещины.

В высокопроницаемых пластах наиболее эффективны жидкости ГРП, которые имеют более высокие показатели вязкости. При таких условиях образуется короткая, но широкая трещина. В низкопроницаемых пластах наиболее эффективно создание длинной трещины с целью подключения в работу более отдаленных недренируемых запасов нефти.

Экспериментально установлено, что при значениях вязкости жидкости ГРП от 100 до 200 сП достигается наибольшая длина. Технологии ГРП с использованием маловязких жидкостей также способствуют ограничению роста трещины в вертикальной плоскости, что очень эффективно в условиях рисков прорыва трещины ГРП в нижележащие водонасыщенные пласты. Поэтому многие нефтегазодобывающие компании заинтересованы в поиске эффективных составов жидкостей ГРП, которые будут обеспечивать максимальную эффективность ГРП (рис. 1).

Основные недостатки высоковязких жидкостей ГРП

На сегодняшний день наиболее известной и распространенной жидкостью разрыва является гуаровая жидкость. Основой для ее замешивания служит камедь, полученная из гуаровых бобов, которая при смешивании с водой образует линейный гель. Гель же, в свою очередь, при добавлении сшивателя образует цепочки полисахаридных соединений для получения высоковязкой системы. Для работы в пластовых условиях также необходим набор химических добавок, таких как деэмульгатор, стабилизаторы глин, деструкторы и бактерициды. В таком виде жидкость разрыва хорошо выполняет свои функции, а именно:

– удерживает пропант во взвешенном состоянии, транспортирует его в пласт;

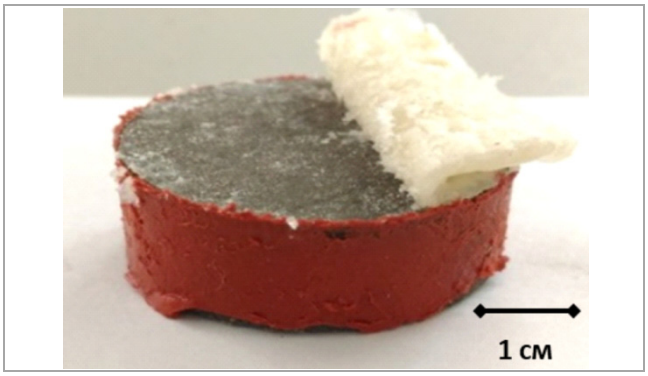


Рис. 2. Образец фильтрационной корки на образце пропанта

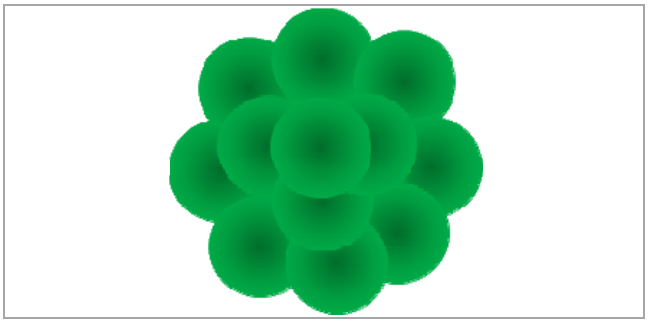


Рис. 3. Сферическая мицелла

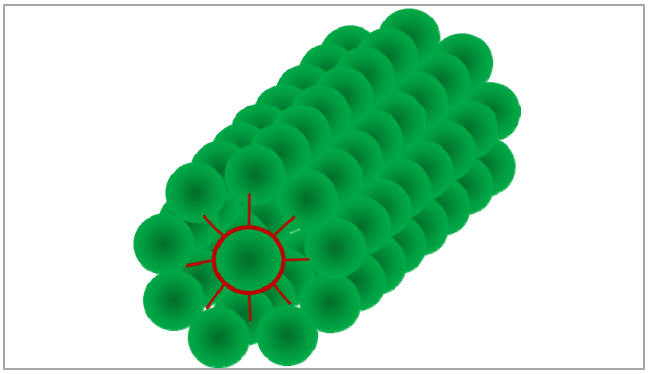


Рис. 4. Трубчатая мицелла

– передает гидравлическое давление от насоса к породе для инициации и развития трещины;

– через определенный промежуток времени происходит разрушение за счет отложенной работы брейкера, и жидкость переходит в текучее состояние.

Однако применение гуарового геля имеет существенные недостатки. Так, из-за реологических свойств жидкости разрыва проведение ГРП в условиях близкорасположенных водонасыщенных пропластков осложнено из-за высокого риска прорыва воды. Трещина имеет небольшую протяженность с образованием каналов в непродуктивной зоне пласта. Кроме того, в процессе фильтрации жидкости образуется фильтрационная корка (рис. 2). Часть геля в пластовых условиях приобретает неразрушимую форму, а другая часть оставляет осадок. В результате проводимость трещины ухудшается относительно базовой проводимости до 40–45 % [5, 6].

В то же время в состав необходимо добавлять большое количество химических реагентов. Замешивается жидкость разрыва только на пресной воде, которую, в свою очередь, необходимо нагревать, что значительно увеличивает время подготовки скважины к ГРП и стоимость проведения ГРП.

На завершающей стадии разработки месторождений для поддержания или дальнейшего наращивания уровня добычи необходимы разработка и использование более совершенных рецептур жидкостей разрыва, позволяющих проводить глубокую интенсификацию в коллекторах с ограниченными перемычками между целевым и нижележащими водонасыщенными пластами.

В настоящее время существует много технологий, которые позиционируются с точки зрения технологии контроля высоты трещины ГРП:

1) системы на основе ПАВ;
2) системы на основе ПАВ и волокон;
3) системы на основе ксантана;
4) системы на основе ПАА;
5) пенные системы на основе азота или диоксида углерода.

Системы на основе ПАВ

Всего два компонента являются основой этих жидкостей: загуститель и многофункциональная добавка. При смешивании с водой частицы ПАВ, являющиеся основой загустителя, объединяются и образуют сферические мицеллы (рис. 3).

По достижении критической концентрации таких мицелл мы получаем линейный гель. Путем добавления многофункциональной добавки (активатора) происходит сшивание геля. В системе образуются трубчатые червеобразные мицеллы (рис. 4), которые запутываются между собой, приобретая хорошую песконесущую способность, что обеспечивает полное соответствие требованиям к жидкостям разрыва.

К преимуществам данной технологии относятся:

– сокращение времени подготовки скважины к ГРП за счет отсутствия необходимости нагрева воды, состав прекрасно смешивается на холодной воде;

– отсутствие необходимости в дополнительных химических добавках для стабилизации смеси в пластовых условиях;

– составляющие отечественного производства, что позволит отказаться от импорта;

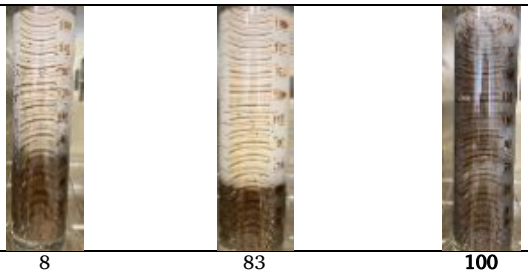
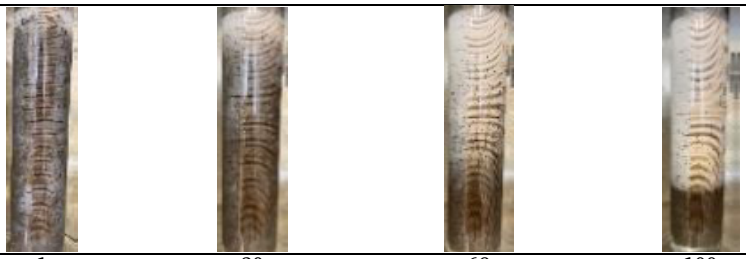
– возможность замешивания состава на слабоминерализованной воде (в перспективе даже на воде из системы ППД).

Системы на основе ПАВ имеют низкую вязкость, что позволяет легко создавать трещины, но это также приводит к неэффективности переноса пропантов. Низкая вязкость не способствует переносу пропантов в указанное место, и эффект укладки пропантов в трещине сильно страдает. Таким образом, пропанты не могут поддерживать трещины, заставляя трещины снова закрываться и серьезно влияя на эффект разрыва. Одновременно большое количество пропантов может осесть в призабойной зоне, загрязняя призабойную зону и серьезно влияя на повторную работу ГРП.

Системы на основе ПАВ и волокон

В настоящее время существуют два метода улучшения способности Slickwater переносить пропанты. Один из них заключается в повышении концентрации загустителей, и повышенная вязкость улучшит способность системы переносить пропанты. Однако для достижения вязкости, необходимой для переноса пропантов, требуется значительно увеличить концентрацию системы, что еще больше повысит стоимость. В то же время увеличение вязкости также отрицательно повлияет на эффективность снижения сопротивления. Другим методом улучшения эффективности переноса пропантов является добавление сшивающего агента. Хотя вязкость значительно повышается, а эффективность переноса песка улучшена,

Результаты лабораторных испытаний на скорость оседания пропанта

Параметр	Значение			
Время, мин	2	20	50	80
Загрузка 10,0 л/м^3				
Осаждение, %	8	83	**100**	
Время, мин	2	20	50	80
Загрузка 10,0 л/м^3				
Осаждение, %	5	26	**49**	85
Время, мин	2	20	50	80
Загрузка 12,0 л/м^3				
Осаждение, %	1	20	69	100

трудно разрушить образовавшиеся гели. Неполное разрушение высоковязких гелей приведет к серьезному повреждению пласта и снижению проницаемости, что повлияет на последующую разработку. Поэтому появились системы на основе ПАВ и волокон с хорошими характеристиками переноса пропантов, низкой стоимостью и высокой остаточной проводимостью трещины (рис. 5).

Волокна обладают хорошей эластичностью и гибкостью. Диспергированные в растворе, они могут изгибаться и скручиваться, образуя структуру волоконной сети, тем самым лучше обволакивают и переносят пропант. В жидкостях для ГРП волокна могут использовать структуру волоконной сети, чтобы прочно удерживать пропанты в сетке. Добавление волокон изменяет поведение осаждения пропантов, улучшая характеристики переноса пропантов жидкостью для ГРП [7]. В то же время волокна могут разрушаться в течение определенного периода, что менее вредно для пласта. В 1995 г. компания Schlumberger впервые предложила концепцию фибрового гидроразрыва (FiberFRAC) и успешно использовала волокна для предотвращения проблемы обратного выноса пропанта. С развитием промышленного процесса производства волокон разлагаемые волокна стали легкодоступными и недорогими и теперь широко используются для временной закупорки и поэтапного гидроразрыва. Однако сообщений об использовании разлагаемых волокон в скользкой воде было мало.

Сырьем для волокон являются полиэфирные волокна. В процессе поликонденсации полиэфирных волокон метод контролируемой свободнорадикальной полимеризации используется для введения сильнополярного функционального мономера (N-акрилоилглицинамида) в молекулярную цепь контролируемым образом. Волокна изготавливаются путем плавления и прядения полимеров.

Жидкость ГРП на основе ПАА

Жидкость ГРП на основе ПАА при добавлении в воду моментально растворяется (в среднем за 30 с), в результате образуется стабильный гель с отличными песконесущими свойствами, который обеспечивает успешное проведение работ по ГРП. Имеется возможность подачи гелеобразователя на основе ПАА в блендер, так как набор вязкости очень быстрый (рис. 6). Вязкость жидкости регулируется в широком диапазоне в зависимости от загрузки, но с увеличением загрузки начинает страдать показатель остаточной проводимости трещины. Жидкость ГРП на основе ПАА обладает рядом преимуществ:

– не предполагает использование сшивающего агента;

– оптимальное время деструкции жидкости без обратной сшивки;

– невысокие показатели потерь давления на трение, хорошие свойства скольжения;

– отличные песконесущие свойства (таблица);

– не требует предварительного нагрева жидкости, инертна к воздействию бактерий [9–11].

Главным недостатком данной технологии является невысокая остаточная проводимость трещины ГРП.

Пенные системы на основе азота или диоксида углерода

Пенная жидкость ГРП – стабильная эмульсия, которая состоит из жидкой фазы (внешняя), окружающей газовой фазы (внутренняя) и полимерно-активных веществ (вспенивающая система) (рис. 7).

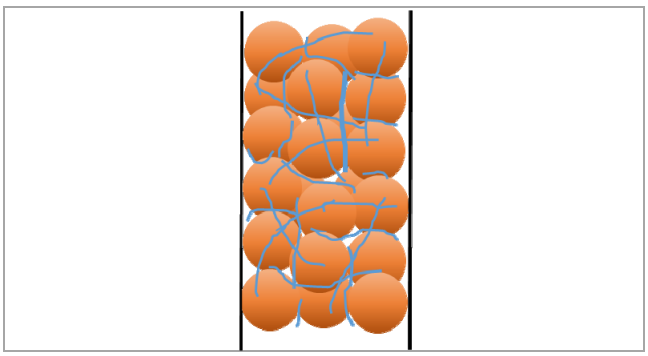


Рис. 5. Структура волоконной сети

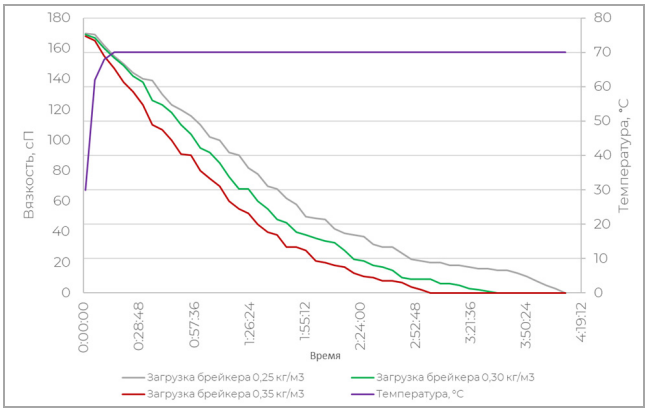


Рис. 6. Испытания жидкости на основе ПАА при различных загрузках брейкера

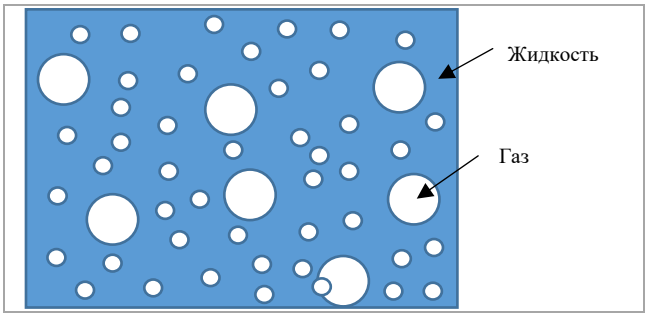


Рис. 7. Структура пенной жидкости ГРП

К основным типам пенных систем относятся:

– пена на основе азота N_2 (закачка производится в газообразном виде);

– пена на основе двуокиси углерода CO_2 (закачка производится в жидком виде).

Пенный ГРП ориентирован на решение следующих ключевых задач:

– повышение скорости и качества очистки трещины;

– ограничение вертикального роста трещины, что критично для эффективной разработки нефтяных и газовых месторождений;

– добавление инертного газа в систему позволяет снизить объем закачиваемой в скважину жидкости;

– равномерное распределение пропанта в трещине за счет высокой удерживающей способности пенных систем;

– возможность контроля высоты трещины за счет низкой по сравнению с традиционными жидкостями вязкости пенных систем [12].

К недостаткам данной технологии относятся:

– понижение гидростатического давления и увеличение устьевого давления в процессе закачки;

– высокая стоимость производства ГРП по сравнению со стандартными технологиями;

– необходимость создания дополнительных условий безопасного производства ГРП.

Использование технологии пенных систем для ГРП в наклонно направленных скважинах, особенно в тех местах, где имеется риск прорыва трещин в водонасыщенные горизонты, требует особого внимания. Применение азотно-пенной смеси может помочь в ограничении вертикального роста трещин, что является важным фактором для предотвращения негативных последствий, связанных с прорывом в водоносные горизонты [13].

Системы на основе ксантана

Ксантановая камедь отличается от гуаровой тем, что полисахарид получается в результате ферментации глюкозы микроорганизмами *Xanthomonas campestris*. Полученный продукт осаждают спиртом. Гуаровая камедь, которая используется в традиционных жидкостях ГРП, является натуральным продуктом и производится от семян бобовых растений.

К основным преимуществам жидкости на основе ксантана относятся:

– сохранение высокой вязкости в кислых средах;

– широкий температурный диапазон применения;

– быстрое восстановление вязкости после снятия динамических нагрузок до 130–150 сП;

– высокие песконесущие показатели при относительно низкой вязкости;

– обеспечение контроля высоты трещины в условиях маломощных барьеров между целевым интервалом и нижележащими водонасыщенными пластами;

– высокая остаточная проводимость трещины – 70–73 %;

– достижение оптимальной геометрии трещины [14, 15].

Так же, как и у остальных систем жидкостей, имеется ряд недостатков:

– для получения рабочей жидкости используются несколько компонентов: сшиватель, брейкер, активатор брейкера, деэмульгатор и стабилизатор глин;

– стоимость ксантановой камеди на 10–15 % дороже по сравнению с традиционной гуровой камедью;

– технология применима для градиента напряжения целевого пласта до 0,150 атм/м.

Проведение ГРП с применением низковязкой жидкости ГРП при толщине межпластовой перемычки между целевым пластом, нижележащим водонасыщенным пластом не менее 2 м исключает прорыв трещины по вертикали. Данный вывод подтверждается результатами моделирования дизайна ГРП в среде симулятора РН-ГРИД (рис. 8).

Заключение

1. За последнее десятилетие заинтересованность нефтегазодобывающих компаний альтернативными технологиями производства ГРП с использованием низковязких жидкостей выросла на 42 %.

2. Альтернативные технологии производства ГРП с использованием низковязких жидкостей позволяют расширить пределы применения ГРП за счет снижения показателя межпластовой перемычки между целевым и нижележащим водонасыщенным пластом с 4 до 2 м.

3. Перспективным решением является использование низковязких жидкостей ГРП в комбинации с облегченными пропантами. Ограниченные песконесущие свойства низковязких жидкостей (100–200 сП) компенсируются низкой плотностью облегченных пропантов (на 27–30 % ниже по сравнению с традиционными пропантами).

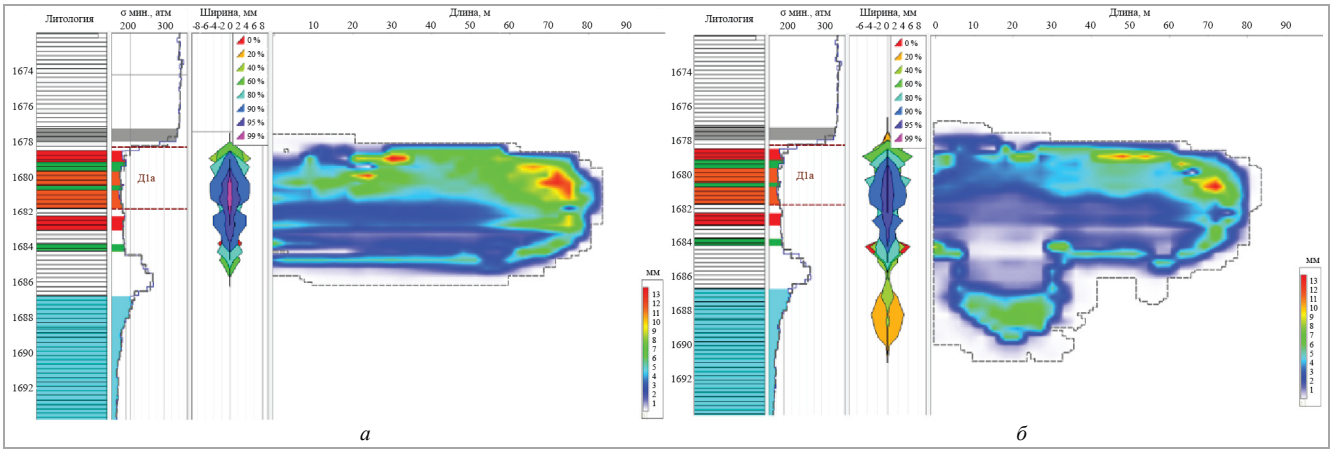


Рис. 8. Результаты моделирования в симуляторе РН-ГРИД при различной толщине межпластовой перемычки:
а – толщина перемычки 2 м; *б* – толщина перемычки 1,75 м

Библиографический список

1. Определение направления образования трещины гидроразрыва пласта / В.В. Паникаровский [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 73–81. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-73-81
2. Перспективы внедрения горизонтальных скважин на месторождениях со сложным геологическим строением / И.Г. Фаттахов [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 3(363). – С. 46–53. DOI: 10.33285/2413-5011-2022-3(363)-46-53
3. Стромило Д.В. Геологические факторы и современные подходы к гидроразрыву пласта [Электронный ресурс] / Д.В. Стромило // Вестник науки. – 2024. – Т. 5, ч. 2, № 12. – С. 418–425. – URL: https://www.вестник-науки.рф/archiv/journal-12-81-5-2.pdf#page=418 (дата обращения: 25.06.2025).
4. Стратегия подбора оптимальной системы и технологии разработки низкопроницаемых карбонатных коллекторов Восточной Сибири [Электронный ресурс] / О.А. Бондаренко [и др.] // Нефтяная провинция: рец. науч. изд. сетевого распространения. – 2024. – № 4(40). – С. 121–136. – URL: https://vkro-raen.com/files/010/039/253/10039253/ori рец. науч. изд. сетевого распространения ginal/40-7-O.A.Bondarenko.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
5. Метод инициации и развития трещины для высокорасходных ГРП в нефтематеринских коллекторах / А.М. Садыков [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. – 2023. – № 7(100). – С. 96–101. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-96-101
6. Вологдин, С.С. Сравнительный анализ методов моделирования ГРП / С.С. Вологдин // Решение прикладных задач нефтегазодобычи на основе классических работ А.П. Телкова и А.Н. Лапердина: материалы нац. науч.-техн. конф., Тюмень, 19 апр. 2024 г. – Тюмень: ТИУ, 2024. – С. 73–76.
7. Диенг, А. Разработка статистической модели прогноза дебита нефти после гидроразрыва пласта на основе геолого-технологических показателей / А. Диенг // Недропользование. – 2024. – Т. 24, № 3. – С. 164-168. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.7
8. Долгих, С.А. Применение метода гидравлического разрыва пласта (ГРП) [Электронный ресурс] / С.А. Долгих, А.Н. Шарофидинов // Нефтяная провинция: рец. науч. изд. сетевого распространения. – 2020. – № 1(21). – С. 146–160. – URL: https://2d5385f0-870f-473a-b271-aa454e83c7c1.filesusr.com/ugd/2e67f9_9d8f500ef57740579968dad3285e953e.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
9. Облегченные проппанты – перспективы и опыт применения в ГРП / А.В. Чураков [и др.] // PROнефть. Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7, № 1(23). – С. 118–125. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-118-125
10. Чухлов, А.С. Оценка влияния геолого-физических характеристик залежей со сложным геологическим строением на условия притока углеводородов / А.С. Чухлов, О.Л. Сальникова, В.И. Черных // Недропользование. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 9–14. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.2
11. Poplygin, V.V. Forecasting Hydraulic Fracturing Results Using Information Amount Theory / V.V. Poplygin, A. Dieng, X. Shi // Недропользование. – 2024. – Т. 24, № 2. – С. 93–100. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.7
12. Применение современной технологии гидравлического разрыва пласта в залежах с подошвенной водой / И.Г. Фаттахов [и др.] // Научное обозрение. – 2016. – № 17. – С. 204–208.
13. Влияние вязкости технологической жидкости на геометрию трещин гидроразрыва / А.В. Насыбуллин [и др.] // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2017. – № 4. – С. 29–34.
14. Опыт и перспективы применения низковязких жидкостей при гидроразрыве пласта в зонах с пониженными фильтрационно-емкостными свойствами и близким водо-нефтяным контактом / А.М. Садыков [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. – 2022. – № 7(92). – С. 72–77. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-7-72-77
15. Перенос пропанта низковязкими жидкостями ГРП. Лабораторные исследования / Э.С. Батыршин [и др.] // XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике: сб. тез. докл., Санкт-Петербург, 21–25 авг. 2023 г. – СПб.: СПбПУ, 2023. – С. 359–360.
16. Новый ответ на технологические вызовы месторождений Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Опыт применения вязкой сликводы на основе сухого полимера на объектах АО «Самаранефтегаз» / С.Н. Кожин [и др.] // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 10(275). – С. 94–106.
17. Кочетков, А.В. Факторы снижения информативности тестовых закачек при проведении пропантных ГРП с использованием полимерных жидкостей на водной основе [Электронный ресурс] / А.В. Кочетков // Нефтяная провинция : рец. науч. изд. сетевого распространения. – 2023. – № 2(34). – С. 191–207. – URL: https://vkro-raen.com/files/008/295/800/8295800/original/34-14-A.V.Kochetkov.pdf (дата обращения: 25.06.2025).
18. Определение направления образования трещины гидроразрыва пласта / В.В. Паникаровский [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 73–81. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-73-81
19. Федоров, А.И. Расчет направления инициирования трещин ГРП в скважине с системой перфорации / А.И. Федоров, Д.Р. Мулюков // Нефтегазовое дело. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 114–126. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-2-114-126
20. Технологии крепления RCP-проппанта в трещине ГРП путем применения экзотермических композиций / И.З. Муллагалин [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2022. – Т. 20, № 4. – С. 38–46. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-38-46
21. Мельников, И.В. Моделирование транспорта проппанта в трещине ГРП с использованием PINN / И.В. Мельников, А.А. Хандаченко // Науки о Земле. Современное состояние: материалы VII Всерос. молодеж. науч.-практ. школы-конференции, Новосибирск, 2-8 авг. 2024 г. – Новосибирск: НГУ, 2024. – С. 194–195.
22. Бабкина, М.И. Исследование геометрии трещин ГРП по результатам гидродинамических исследований скважин на месторождениях Самарской области / М.И. Бабкина, К.И. Бабицкая // EurasiaScience: сб. ст. XXXIII междунар. науч.-практ. конф., Москва, 15 нояб. 2020 г. – М.: Актуальность.РФ, 2020. – С. 35–38.
23. Экспериментальное исследование проводимости трещины ГРП при добыче сланцевой нефти / Я. Ин [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2024. – Т. 22, № 4. – С. 26–36. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-26-36
24. Шипилов, А.И. Исследования вязкоупругих и пескоудерживающих свойств жидкости гидроразрыва пласта на основе вязкоупругих поверхностно-активных веществ / А.И. Шипилов, Е.В. Крутихин, О.Ш. Гоголишвили // Нефтепромысловое дело. – 2019. – № 5(605). – С. 17–23. DOI: 10.30713/0207-2351-2019-5(605)-17-23
25. Гайнуллин, Ю.И. Применение технологии fiberfrac на месторождениях Сургутского района / Ю.И. Гайнуллин // Новая наука как результат инновационного развития общества: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф., Сургут, 22 апр. 2017 г.: в 17 ч. – Сургут: Агентство международных исследований, 2017. – Ч. 2. – С. 124–126.
26. Файзуллин, И.Г. Пути повышения эффективности ГРП за счет применения полиакрилатных систем на месторождениях «Газпром нефти» / И.Г. Файзуллин, Р.Н. Хасаншин // Нефть. Газ. Новации. – 2023. – № 8(273). – С. 73–77.
27. Колесник, С.В. Интенсификация добычи нефти посредством применения жидкости гидроразрыва пласта на основе полиакриламида / С.В. Колесник, М.Э. Ефимов // Нефтепромысловое дело. – 2023. – № 9(657). – С. 43–47. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-9(657)-43-47
28. Сахибгараев, Р.Р. Новые химические реагенты для ГРП. Способы оптимизации ГРП / Р.Р. Сахибгараев // Инженерная практика. – 2023. – № 7-8. – С. 16–24.
29. Применение полиакриламидов в гидравлическом разрыве пласта / А.Ф. Гарипова [и др.] // Вестник молодого ученого УГНТУ. – 2025. – № 2(30). – С. 37–43.
30. Абусал, Ю. Применение вязкоупругих систем для гидравлического разрыва пласта в горизонтальных скважинах / Ю. Абусал, А.Р. Яхин, Л.Р. Галимзянова // Бурение и нефть. – 2024. – № 5. – С. 48–51. DOI: 10.62994/2072-4799.2024.77.90.007
31. Мирзамов, Н.А. Технология пенного гидроразрыва пласта / Н.А. Мирзамов // Академический журнал Западной Сибири. – 2020. – Т. 16, № 1(84). – С. 56–58.
32. Опыт проведения гидроразрыва пласта с использованием пенных систем на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз» / А.П. Кондаков [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 8. – С. 36–39.

33. Разработка подходов к тестированию пенных систем для интенсификации добычи нефти / Т.В. Чабина [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2021. – № 3(627). – С. 29–35. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-3(627)-29-35
34. Абрамов, В.В. Применение технологий ОПЗ и ГРП с СО2 для увеличения добычи нефти на месторождениях АО «Самаранефтегаз» / В.В. Абрамов, А.А. Саринов // Сборник тезисов докладов научно-технического форума ООО «Самаранипинефть», Самара, 31 мая-27 сент. 2023 г. – Самара: Портал Инноваций, 2023. – С. 144–145.
35. Файзуллин, И.Г. Опыт повышения эффективности стимуляции скважин методом ГРП в ОАО «Газпром нефть» / И.Г. Файзуллин // Нефть. Газ. Новации. – 2011. – № 7(150). – С. 59–62.
36. Файзулаев, Э.Р. Анализ использования пенных систем для модернизации технологии гидроразрыва пласта / Э.Р. Файзулаев // Новейшие технологии освоения месторождений углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем Каспийского шельфа: материалы XIV Междунар. науч.-практ. конф., Астрахань, 11–12 окт. 2023 г. – Астрахань: АГТУ, 2023. – С. 131–134.
37. Кашапов, Д.В. Математическое моделирование оседания пропанта в горизонтальной скважине при проведении операции гидравлического разрыва пласта на маловязкой жидкости / Д.В. Кашапов, Л.Р. Шакиров // Бурение и нефть. – 2021. – № 7-8. – С. 60–66.
38. Захарова, Е.Ф. Эффективность кислотных составов и ГРП с МВЖ в рамках тиражирования технологий ФЦП / Е.Ф. Захарова, А.Н. Фаррахова // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли: сб. материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., г. Альметьевск, 12 дек. 2022 г. – Альметьевск: АГНИ, 2022. – С. 36–43.
39. Повторный гидроразрыв с уменьшением массы проппанта / Т.Ю. Юсифов [и др.] // Научное обозрение. – 2014. – № 11-1. – С. 139–142.
40. Оценка рисков проведения гидроразрыва пласта в скважинах для ряда значений зенитного угла ствола скважины на основе статистического анализа / И.Г. Фаттахов [и др.] // Нефтепромысловое дело. – 2022. – № 2(638). – С. 31–36. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-2(638)-31-36
41. Моделирование гидродинамических процессов в условиях разработки некондиционных коллекторов скважинами с ГРП / Р.Х. Гильманова [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 7(367). – С. 59–63. DOI: 10.33285/2413-5011-2022-7(367)-59-63
42. Влияние геологических характеристик нефтегазовой залежи на эффективность гидравлического разрыва пласта / А.В. Кустышев [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2015. – № 1. – С. 52–58.

References

1. Panikarovskii V.V. et al. Opredelenie napravleniia obrazovaniia treshchiny gidrorazryva plasta [Determination of crack formation direction]. *Neftegazovoe delo*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 73-81. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-73-81
2. Fattakhov I.G. et al. Perspektivy vnedreniia gorizontal'nykh skvazhin na mestorozhdeniiakh so slozhnym geologicheskim stroeniem [Prospects for horizontal wells construction in the fields with a complex geological structure]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2022, no. 3 (363), pp. 46-53. DOI: 10.33285/2413-5011-2022-3(363)-46-53
3. Stromilo D.V. Geologicheskie faktory i sovremennye podkhody k gidrorazryvu plasta [Geological factors and modern approaches to hydraulic fracturing]. *Vestnik nauki*, 2024, vol. 5, part 2, no. 12, pp. 418-425, available at: https://www.вестник-науки.рф/archiv/journal-12-81-5-2.pdf#page=418 (accessed 25 June 2025). DOI: 10.24412/2712-8849-2024-1281-418-425
4. Bondarenko O.A. et al. Strategiia podbora optimal'noi sistemy i tekhnologii razrabotki nizkopronitsaemykh karbonatnykh kollektorov Vostochnoi Sibiri [The strategy of selecting the optimal system and technology for the development of low-permeability carbonate reservoirs in Eastern Siberia]. *Neftianaia provintsiia: retsenziruemoe nauchnoe izdanie setevogo rasprostraneniia*, 2024, no. 4 (40), pp. 121-136, available at: https://vkro-raen.com/files/010/039/253/10039253/оригец.науч.изд.сетевогораспространенияginal/40-7-O.A.Bondarenko.pdf (accessed 25 June 2025). DOI: 10.25689/NP.2024.4.121-136
5. Sadykov A.M. et al. Metod initsiatsii i razvitiia treshchiny dlia vysokoraskhodnykh GRP v neftematerinskikh kollektorakh [Fracture initiation and propagation method for high-rate hydraulic fracturing in source rock reservoirs]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2023, no. 7 (100), pp. 96-101. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-7-96-101
6. Vologdin S.S. Sravnitel'nyi analiz metodov modelirovaniia GRP [Comparative analysis of hydraulic fracturing modeling methods]. *Reshenie prikladnykh zadach neftegazodobychi na osnove klassicheskikh rabot A.P. Telkova i A.N. Laperdina. Materialy natsional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Tiumen', 19 April 2024*. Tiumen': Tiumenskii industrial'nyi universitet, 2024, pp. 73-76.
7. Dieng A. Razrabotka statisticheskoi modeli prognoza debita nefti posle gidrorazryva plasta na osnove geologo-tekhnologicheskikh pokazatelei [Development of a statistical model for predicting the oil production rate after fracking by geological and technological indicators]. *Nedropol'zovanie*, 2024, vol. 24, no. 3, pp. 164-168. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.3.7
8. Dolgikh S.A., Sharofidinov A.N. Primenenie metoda gidravlicheskogo razryva plasta (GRP) [Hydraulic fracturing application]. *Neftianaia provintsiia: retsenziruemoe nauchnoe izdanie setevogo rasprostraneniia*, 2020, no. 1 (21), pp. 146-160, available at: https://2d5385f0-870f-473a-b271-aa454e83c7c1.filesusr.com/ugd/2e67f9_9d8f500ef5774057996 8dad3285e953e.pdf (accessed 25 June 2025). DOI: 10.25689/NP.2020.1.146-160
9. Churakov A.V. et al. Oblegchennye proppanty - perspektivy i opyt primeneniia v GRP [Ultra-light weight proppants - perspectives and experience of application in hydraulic fracturing]. *PROneft'. Professional'no o nefti*, 2022, vol. 7, no. 1 (23), pp. 118-125. DOI: 10.51890/2587-7399-2022-7-1-118-125
10. Chukhlov A.S., Sal'nikova O.L., Chernykh V.I. Otsenka vliianiia geologo-fizicheskikh kharakteristik zalezhei so slozhnym geologicheskim stroeniem na usloviia pritoka uglevodorodov [nfluence Evaluation of Geological and Physical Characteristics of Reservoirs with a Complex Geological Structure on the Conditions of Hydrocarbons Inflow]. *Nedropol'zovanie*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 9-14. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.2
11. Poplygin V.V., Dieng A., Shi X. Forecasting Hydraulic Fracturing Results Using Information Amount Theory. *Nedropol'zovanie*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 93-100. DOI: 10.15593/2712-8008/2024.2.7
12. Fattakhov I.G. et al. Primenenie sovremennoi tekhnologii gidravlicheskogo razryva plasta v zalezhakh s podoshvennoi vodoi [Application of advanced technology of hydraulic fracturing in the reservoirs with bottom water]. *Nauchnoe obozrenie*, 2016, no. 17, pp. 204-208.
13. Nasybullin A.V. et al. Vliianie viazkosti tekhnologicheskoi zhidkosti na geometriiu treshchin gidrorazryva [The influence of process fluid viscosity on the geometry of hydraulic fractures]. *Oborudovanie i tekhnologii dlia neftegazovogo kompleksa*, 2017, no. 4, pp. 29-34.
14. Sadykov A.M. et al. Opyt i perspektivy primeneniia nizkoviazkikh zhidkostei pri gidrorazryve plasta v zonakh s ponizhennymi fil'tratsionno-emkostnymi svoistvami i blizkim vodo-neftianym kontaktom [Experience and prospects for the use of low-viscosity fluids during hydraulic fracturing in zones with poor reservoir quality and vicinity of water-oil contact]. *Ekspozitsiia Neft' Gaz*, 2022, no. 7 (92), pp. 72-77. DOI: 10.24412/2076-6785-2022-7-72-77
15. Batyrshin E.S. et al. Perenos propanta nizkoviazkimi zhidkostiami GRP. Laboratornye issledovaniia [Proppant Transfer by Low-Viscosity Hydraulic Fracturing Fluids. Laboratory Studies]. *XIII Vserossiiskii s"ezd po teoreticheskoi i prikladnoi mekhanike. Sbornik tezisov dokladov, Sankt-Peterburg, 21-25 August 2023*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2023, pp. 359-360.
16. Kozhin S.N. et al. Novyi otvet na tekhnologicheskie vyzovy mestorozhdenii Volgo-Ural'skoi neftegazonosnoi provintsii. Opyt primeneniia viazkoi slikvody na osnove sukhogo polimera na ob"ektakh AO “Samaraneftegaz” [A New Response to the Technological Challenges of the Volga-Ural Oil and Gas Province. Experience with the Use of Viscous Slickwater Based on Dry Polymer at Samaraneftegaz Facilities]. *Neft'. Gaz. Novatsii*, 2023, no. 10 (275), pp. 94-106.
17. Kochetkov A.V. Faktory snizheniia informativnosti testovykh zakachek pri provedenii propantnykh GRP s ispol'zovaniem polimernykh zhidkostei na vodnoi osnove [Factors of reducing the informativity of test injections during proppant fracturing with water-based polymer fluids]. *Neftianaia provintsiia: retsenziruemoe nauchnoe izdanie setevogo rasprostraneniia*, 2023, no. 2 (34), pp. 191-207, available at: https://vkro-raen.com/files/008/295/800/8295800/original/34-14-A.V.Kochetkov.pdf (accessed 25 June 2025). DOI: 10.25689/NP.2023.2. 191-207
18. Panikarovskii V.V. et al. Opredelenie napravleniia obrazovaniia treshchiny gidrorazryva plasta [Determination of crack formation direction hydraulic fracturing]. *Neftegazovoe delo*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 73-81. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-73-81
19. Fedorov A.I., Muliukov D.R. Raschet napravleniia initsiirovaniia treshchin GRP v skvazhine s sistemoi perforatsii [Calculation of fracture initiation direction in perforated well]. *Neftegazovoe delo*, 2023, vol. 21, no. 2, pp. 114-126. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-2-114-126
20. Mullagalin I.Z. et al. Tekhnologii krepleniia RCP-proppanta v treshchine GRP putem primeneniia ekzotermicheskikh kompozitsii [Technologies for fixing the RCP-proppant in a hydraulic fracturing crack by applying exothermic compositions]. *Neftegazovoe delo*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 38-46. DOI: 10.17122/ngdelo-2022-4-38-46
21. Mel'nikov I.V., Khandachenko A.A. Modelirovanie transporta proppanta v treshchine GRP s ispol'zovaniem PINN [Modeling proppant transport in a hydraulic fracture using PINN]. *Nauki o Zemle. Sovremennoe sostoianie. Materialy VII Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi shkoly-konferentsii, Novosibirsk, 2-8 August 2024*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi universitet, 2024, pp. 194-195.
22. Babkina M.I., Babitskaia K.I. Issledovanie geometrii treshchin GRP po rezul'tatam gidrodinamicheskikh issledovanii skvazhin na mestorozhdeniiakh Samarskoi oblasti [Study of the geometry of hydraulic fractures based on the results of hydrodynamic studies of wells at fields in the Samara region]. *EurasiaScience. Sbornik statei XXXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 15 November 2020*. Moscow: Aktual'nost'.RF, 2020, pp. 35-38.
23. In Ia. et al. Eksperimental'noe issledovanie provodimosti treshchiny GRP pri dobyche slantsevoi nefti [Experimental study on the fracture conductivity in shale oil production]. *Neftegazovoe delo*, 2024, vol. 22, no. 4, pp. 26-36. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-4-26-36
24. Shipilov A.I., Krutikhin E.V., Gogolishvili O.Sh. Issledovaniia viazkouprugikh i peskouderzhivaiushchikh svoistv zhidkosti gidrorazryva plasta na osnove viazkouprugikh poverkhnostno-aktivnykh veshchestv [Research of viscoelastic and sand carrying properties of viscoelastic surfactant based fracturing fluids]. *Neftepromyslovoe delo*, 2019, no. 5 (605), pp. 17-23. DOI: 10.30713/0207-2351-2019-5(605)-17-23
25. Gainullin Iu.I. Primenenie tekhnologii fiberfrac na mestorozhdeniiakh Surgutskogo raiona [Application of fiberfrac technology in the Surgut region]. *Novaia nauka kak rezul'tat innovatsionnogo razvitiia obshchestva. Sbornik statei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Surgut, 22 April 2017*. Surgut: Agentstvo mezhdunarodnykh issledovanii, 2017, part 2, pp. 124-126.
26. Faizullin I.G., Khasanshin R.N. Puti povysheniia effektivnosti GRP za schet primeneniia poliakrilatnykh sistem na mestorozhdeniiakh “Gazprom nefti” [Ways to Increase the Efficiency of Hydraulic Fracturing Through the use of Polyacrylate Systems at Gazprom Neft Fields]. *Neft'. Gaz. Novatsii*, 2023, no. 8 (273), pp. 73-77.

27. Kolesnik S.V., Efimov M.E. Intensifikatsiia dobychi nefti posredstvom primeneniia zhidkosti gidrorazryva plasta na osnove poliakrilamida [Intensification of oil production through the use of hydraulic fracturing fluid based on polyacrylamide]. *Neftepromyslovoe delo*, 2023, no. 9 (657), pp. 43-47. DOI: 10.33285/0207-2351-2023-9(657)-43-47
28. Sakhibgaraev R.R. Novye khimicheskie reagenty dlia GRP. Sposoby optimizatsii GRP [New Chemical Reagents for Hydraulic Fracturing. Methods for Optimizing Hydraulic Fracturing]. *Inzhenernaia praktika*, 2023, no. 7-8, pp. 16-24.
29. Garipova A.F. et al. Primenenie poliakrilamidov v gidravlicheskom razryve plasta [Application of polyacrylamides in hydraulic fracturing]. *Vestnik molodogo uchenogo Ufimskogo gosudarstvennogo neftianogo tekhnicheskogo universiteta*, 2025, no. 2 (30), pp. 37-43.
30. Abusal Iu., Iakhin A.R., Galimzianova L.R. Primenenie viazkouprugikh sistem dlia gidravlicheskogo razryva plasta v gorizontal'nykh skvazhinakh [Application of viscoelastic systems for hydraulic fracturing in horizontal wells]. *Burenie i neft'*, 2024, no. 5, pp. 48-51. DOI: 10.62994/2072-4799.2024.77.90.007
31. Mirzamov N.A. Tekhnologiia pennogo gidrorazryva plasta [Foam fracturing technology]. *Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri*, 2020, vol. 16, no. 1 (84), pp. 56-58.
32. Kondakov A.P. et al. Opyt provedeniia gidrorazryva plasta s ispol'zovaniem pennykh sistem na mestorozhdeniiakh OAO “Surgutneftegaz” [Experience of hydraulic fracturing with use of foam systems at the fields of Surgutneftegaz OJSC]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2012, no. 8, pp. 36-39.
33. Chabina T.V. et al. Razrabotka podkhodov k testirovaniiu pennykh sistem dlia intensifikatsii dobychi nefti [Development of approaches to testing foam systems for intensification of oil production]. *Neftepromyslovoe delo*, 2021, no. 3 (627), pp. 29-35. DOI: 10.33285/0207-2351-2021-3(627)-29-35
34. Abramov V.V., Sarinov A.A. Primenenie tekhnologii OPZ i GRP s CO2 dlia uvelicheniia dobychi nefti na mestorozhdeniiakh AO “Samaraneftegaz” [Application of CO2-assisted hydraulic fracturing and gas treatment technologies to increase oil production at the fields of JSC Samaraneftegaz]. *Sbornik tezisov dokladov nauchno-tekhnicheskogo foruma OOO “Samaranipineft'”, Samara, 31 May - 27 September 2023*. Samara: Portal Innovatsii, 2023, pp. 144-145.
35. Faizullin I.G. Opyt povysheniia effektivnosti stimuliatsii skvazhin metodom GRP v OAO “Gazprom neft'” [Practical experience of OAO "Gazpromneft" in increasing the well stimulation effectiveness by hydro fracturing]. *Neft'. Gaz. Novatsii*, 2011, no. 7 (150), pp. 59-62.
36. Faizulaev E.R. Analiz ispol'zovaniia pennykh sistem dlia modernizatsii tekhnologii gidrorazryva plasta [Analysis of the use of foam systems for modernization of hydraulic fracturing technology]. *Noveishie tekhnologii osvoeniia mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ia i obespechenie bezopasnosti ekosistem Kaspiiskogo shel'fa. Materialy XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Astrakhan', 11-12 October 2023*. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2023, pp. 131-134.
37. Kashapov D.V., Shakirov L.R. Matematicheskoe modelirovanie osedaniia proppanta v gorizontal'noi skvazhine pri provedenii operatsii gidravlicheskogo razryva plasta na maloviazkoi zhidkosti [Mathematical modeling of proppant settling in a horizontal well during hydraulic fracturing operation on a low-viscosity fluid]. *Burenie i neft'*, 2021, no. 7-8, pp. 60-66.
38. Zakharova E.F., Farrakhova A.N. Effektivnost' kislotnykh sostavov i GRP s MVZh v ramkakh tirazhirovaniia tekhnologii FTsP [Efficiency of acid compositions and hydraulic fracturing with microfluidic liquids within the framework of the replication of Federal Target Program technologies]. *Dostizheniia, problemy i perspektivy razvitiia neftegazovoi otrasli. Sbornik materialov VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Al'met'evsk, 12 December 2022*. Al'met'evsk: Al'met'evskii gosudarstvennyi neftianoi institut, 2022, pp. 36-43.
39. Iusifov T.Iu. et al. Povtornyi gidrorazryv s umen'sheniem massy proppanta [Re-fracturing with proppant mass reduction]. *Nauchnoe obozrenie*, 2014, no. 11-1, pp. 139-142.
40. Fattakhov I.G. et al. Otsenka riskov provedeniia gidrorazryva plasta v skvazhinakh dlia riada znachenii zenitnogo ugla stvola skvazhiny na osnove statisticheskogo analiza [Estimation of hydraulic fracturing risks, performed in wells for a set of the zenith angle values of a wellbore based on the statistical analysis]. *Neftepromyslovoe delo*, 2022, no. 2 (638), pp. 31-36. DOI: 10.33285/0207-2351-2022-2(638)-31-36
41. Gil'manova R.Kh. et al. Modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov v usloviiakh razrabotki nekonditsionnykh kollektorov skvazhinami s GRP [Modeling of hydrodynamic processes in the conditions of substandard reservoirs development by wells with hydraulic fracturing]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2022, no. 7 (367), pp. 59-63. DOI: 10.33285/2413-5011-2022-7(367)-59-63
42. Kustyshev A.V. et al. Vliianie geologicheskikh kharakteristik neftegazovoi zalezhi na effektivnost' gidravlicheskogo razryva plasta [Influence of geological characteristics of an oil and gas deposit on the efficiency of a formation hydraulic fracturing]. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2015, no. 1, pp. 52-58.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.