

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2025.4.202-220>

EDN FBKQLP

УДК 622.276.66

Перспективы применения комбинированных гуаро-боратных бинарных термохимических композиций для гидроразрыва пласта в «холодных» пластах

Маннанов И.И., Ганиева Г.Р., Аникин О.В., Тазеев А.Р., Минханов И.Ф.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Prospects for the application of combined guar-borate binary thermochemical compositions for hydraulic fracturing in low-temperature formations

I.I. Mannanov, G.R. Ganieva, O.V. Anikin, A.R. Tazeev, I.F. Minhanov

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia

E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

Аннотация. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является ключевым методом разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Его эффективность в низкотемпературных коллекторах лимитируется замедленной и неполной деструкцией полимерного геля жидкостей разрыва на основе гидроксипропилгуара, что приводит к значительному остаточному повреждению проводимости трещин и приквасинной зоны пласта. В представленной работе исследуется подход к модификации традиционных гуаро-боратных систем путём введения бинарных термохимических реагентов, обеспечивающих контролируемую активацию экзотермической реакции непосредственно в пластовых условиях. Ключевым аспектом является индуцирование *in situ* процесса, сочетающего термическое разложение полимерной матрицы, генерацию давления и газодинамический эффект, направленных на полную деструкцию геля до ньютоновской жидкости с вязкостью $\sim 1,1$ мПа·с. Лабораторные исследования подтвердили, что разработанная композиция сохраняет стабильные реологические свойства на этапе закачки (вязкость сшитого геля >500 сР при 100 с^{-1}), а последующая активация кислотным агентом обеспечивает быстрый рост температуры до $73\text{--}83\text{ }^{\circ}\text{C}$ и полную деградацию геля. Установлено, что использование поверхностно-активных веществ в составе акти-

ватора позволяет генерировать стабильные пенные системы с кратностью до 25, способствующие механическому вытеснению продуктов деструкции из порового пространства. Показано, что вторичными, но значимыми эффектами технологии являются очистка породы от кольматантов и создание термических условий для закрепления проппанта со смоляным покрытием (RCP). Результаты работы демонстрируют потенциал применения термохимических композиций для решения фундаментальной проблемы остаточного повреждения низкотемпературных пластов неразрушенными полимерными остатками.

Ключевые слова: *гуаро-боратные жидкости, термохимические составы, термохимическая реакция, генерация тепла и давления, реология, деструкция геля, пропантная пачка, АСПО, очистка трещины, очистка пласта, проводимость, спекание RCP пропанта*

Для цитирования: Маннанов И.И., Ганиева Г.Р., Аникин О.В., Тазеев А.Р., Минханов И.Ф. Перспективы применения комбинированных гуаро-боратных бинарных термохимических композиций для гидроразрыва пласта в «холодных» пластах // Нефтяная провинция.-2025.-№4(44).-С. 202-220. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.4.202-220>. - EDN FBKQLP

Abstract. Hydraulic fracturing (HF) is a key method for developing hard-to-recover hydrocarbon reserves. Its effectiveness in low-temperature reservoirs is limited by the delayed and incomplete degradation of the polymer gel in hydroxypropylguar (HPG)-based fracturing fluids, leading to significant residual damage to fracture and near-wellbore zone conductivity.

This paper investigates an approach to modifying conventional guar-borate systems by introducing binary thermochemical reagents that provide controlled activation of an exothermic reaction directly under reservoir conditions. A key aspect is the induction of an in situ process that combines thermal decomposition of the polymer matrix, pressure generation, and a gas-drive effect, aimed at the complete degradation of the gel into a Newtonian fluid with a viscosity of $\sim 1.1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$.

Laboratory studies confirmed that the developed composition maintains stable rheological properties during the injection stage (crosslinked gel viscosity $> 500 \text{ cP}$ at 100 s^{-1}), while subsequent activation by an acid agent ensures a rapid temperature increase to $73\text{--}83^\circ\text{C}$ and complete gel degradation. It was established that using surfactants within the activator composition enables the generation of stable foam systems with a quality of up to 25, which facilitates the mechanical displacement of degradation products from the pore space.

It is shown that secondary, yet significant, effects of the technology include the clean-up of formation damage (clays, mud) and the creation of thermal conditions for the consolidation of resin-coated proppant (RCP). The results demonstrate the potential of using thermochemical compositions to address the fundamental problem of residual damage in low-temperature reservoirs caused by undegraded polymer residues.

Key words: *guar-borate fluids, thermochemical compositions, thermochemical reaction, heat and pressure generation, rheology, gel degradation, proppant pack, formation damage (ASPO), fracture clean-up, formation clean-up, conductivity, resin-coated proppant (RCP) curing*

For citation: I.I. Mannanov, G.R. Ganieva, O.V. Anikin, A.R. Tazeev, I.F. Minhanov Perspektivy primeneniya kombinirovannykh guaro-boratnykh binarnykh termokhimicheskikh kompozitsiy dlya gidrorazryva plasta v «kholodnykh» plastakh [Prospects for the application of combined guar-borate binary thermochemical compositions for hydraulic fracturing in low-temperature formations]. Neftyanaya Provintsiya, No. 4(44), 2025. pp. 202-220. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2025.4.202-220>. EDN FBKQLP (in Russian)

Введение

Эффективность гидравлического разрыва пласта (ГРП) в значительной степени определяется степенью очистки созданной трещины и прилегающей к ней зоны пласта от остатков технологических жидкостей [1, 2]. В условиях низкотемпературных коллекторов (менее 60 °С), характерных для ряда месторождений Западной Сибири, Волго-Уральской провинции и Восточной Сибири [3–5], применение традиционных гуаровых гелей сопряжено с критической проблемой замедленной и неполной деструкции полимерной матрицы [6]. Низкая температура ингибирует активность окислительных деструкторов (персульфатов), что приводит к сохранению высокомолекулярных остатков гуара в пропантной набивке и поровом пространстве [7, 8]. Это, в свою очередь, вызывает значительное снижение конечной проводимости трещины и недостаточный прирост продуктивности скважин после ГРП, что подтверждается полевыми данными [9, 10, 11, 12].

Существующие технологические решения направлены на частичную компенсацию данного недостатка через применение низковязких жидкостей, оптимизацию составов деструкторов [13, 14]. Кроме всего прочего в низкотемпературных пластах в связи с низкой деструкцией геля ГРП возникает проблема обратного выхода проппанта при освоении скважин. Традиционное использование проппантов со смоляным покрытием (RCP), от-

части решает поставленную задачу, но их применение возможно при использовании добавок активируемых при низких температурах [15, 16]. Представленные подходы носят паллиативный характер и не решают фундаментальную проблему остаточного повреждения пласта полимером.

Перспективным направлением является разработка жидкостей разрыва, совмещающих транспортные функции и способность к полной автономной деструкции по завершении основного этапа ГРП. В данном контексте значительный интерес представляют термохимические композиции (ТХС), способные к активации *in situ* с выделением значительных количеств тепла и газа. Генерируемое тепло интенсифицирует процессы деполимеризации гуаровой матрицы, а газовый импульс способствует механическому вытеснению продуктов разложения из порового пространства [16]. Несмотря на имеющиеся наработки в области термохимического воздействия на пласт [17], вопросы интеграции термохимических реагентов в состав стандартных гуаро-боратных жидкостей и их влияния на реологию и процесс сшивки изучены недостаточно.

Целью данной работы является лабораторное исследование реологических свойств и эффективности деструкции модифицированной гуаро-боратной жидкости, насыщенной бинарной термохимической системой (нитрит натрия + карбамид), и оценка перспектив её применения для ГРП в низкотемпературных пластах.

Ключевой задачей настоящего исследования являлась разработка методики модификации традиционной гуаро-боратной жидкости гидроразрыва пласта для придания ей свойств термохимического состава. Основная концепция предлагаемого решения основана на создании многофункциональной системы, способной последовательно выполнять следующие функции:

- обеспечение стандартных операций ГРП за счет сохранения реологических и транспортных характеристик традиционных жидкостей до момента активации;
- термическое воздействие на притрещинную зону пласта, способствующее очистке порового пространства и увеличению эффективной проводимости;
- создание термических условий, необходимых для активации смолы RCP-пропантов;
- удаление жидкостных и механических повреждений (АСПО) в интервале трещины гидроразрыва;
- инновационность подхода.

Предлагаемое решение принципиально отличается от традиционных технологий тем, что объединяет в одной системе функции:

- жидкости для проведения гидроразрыва пласта;
- термохимического агента для обработки трещины;
- активатора закрепления пропантной пачки;
- реагента для удаления повреждений.

Комплексный подход позволяет исключить необходимость выполнения отдельных операций по дополнительному закреплению пропанта и деструкции геля, что существенно сокращает время проведения работ и снижает операционные риски.

Экспериментальная часть

В рамках исследования термохимических систем (ТХС) для жидкостей гидроразрыва пласта были проведены комплексные испытания, включавшие анализ свободного объема, моделирование реологического поведения систем и оценку воздействия продуктов реакции на поровую среду.

Для приготовления рабочих растворов использовались лабораторные верхнеприводный блендер DLab OS20-Pro и нижнеприводный блендер Waring TORQ 2.0 (США). Реологические исследования проводились при 25 °С на вискозиметре Ofite 900 с Ротор R1 боб В5.

Бинарный термохимический раствор для исследований возможности создания системы с синергетическим эффектом представлял собой состав на доступном отечественном сырье из компонентов, преимущественно известных как удобрения продуктов аграрной промышленности.

В рамках поставленной задачи по разработке бинарных систем для технологии комбинированного ГРП в низкотемпературных пластах с температурой до 60°С, в данной работе подобрана система на основе нитрита натрия и карбамида с возможностью активации с использованием сульфаминовой кислоты или соляной кислоты с минимальным содержанием оксида азота и преимущественным содержанием углекислого газа в продуктах реакции. Отличительной особенностью подобранной системы является минимальное влияние насыщающих бинарных солей на рН системы и, как следствие, на возможность приготовления жидкостей ГРП. Показана возможность создания и устойчивость жидкости гидроразрыва на традиционных гуаровых компонентах основой, которой является предложенная бинарная система. Особенностью системы является полное исключение бактерицида из компонентов системы, т.к. бинарные соли выполняют эту роль и исключение брейкера в виду слабого влияния на деструкцию геля. Роль брейкера в системе отводится сульфаминовой, уксусной или соляной кислотам. Тип активатора определяется составом пластовых вод для исключения рисков образования осадков, например, гипса. Система стабильна в температурных условиях до 60°С.

Основные компоненты жидкости ГРП были идентичны промышленно применяемым в системах ГРП и включали следующие компоненты, со-

ответствующие промышленным загрузкам, которые представлены в табл. 1.

Для приготовления раствора использовалась пресная водопроводная вода. Были изучены различные концентрации термохимических компонентов, обеспечивающих стабильность системы при температурах до 60°C. Оценка стабильности системы оценивалась выдержкой при температурных условиях водяной бани в течение 2 часов.

Таблица 1

**Загрузки компонентов системы для приготовления жидкости ГРП
с насыщающими бинарными компонентами**

Реагенты	Марка	Ед.изм.	Концентрация в жидкости
Биоцид,	ТТ BIO	л/м3	0,02
Гелеобразователь,	ТТ WG	кг/м3	3
Деэмульгатор	ТТ NE	л/м3	1
Стабилизатор глин	ТТ CS	л/м3	2
Брейкер	ТТ BA марка	кг/м3	0,7
Сшиватель	ТТ BC марка	л/м3	1,2

Подбор смеси активных бинарных солей, как основы приготовления жидкости ГРП, предусматривал минимальное изменение pH системы для сохранения свойств гидратации геля, сшивки, реологических свойств и совместимости с пластовыми флюидами. Исследованные концентрации систем представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Основные физико-технологические характеристики бинарного раствора
и сшитого геля ГРП**

Насыщенность раствора БС	Плотность, кг/м3	Жидкость ТХВ (ТСF), pH	Тгидр., сек	Тсшивки., сек	Жидкость ГРП, pH
пресная вода	1000	7,01	120	150	8,34
15 %	1038	7,5	120	150	8,44
25 %	1110	8	120	155	8,49
35 %	1190	8,5	120	165	8,68

Присутствие в составе жидкости ГРП бинарных термохимических компонентов не имеют влияния на скорость гидратации раствора жидкости ГРП и на сшивающую способность, кроме того, исследовалась стабильность системы в течение 4 часов времени.

Внешний вид жидкостей ГРП, приготовленных при разной концентрации подобранной системы термохимических компонентов, приводится на рис. 1.

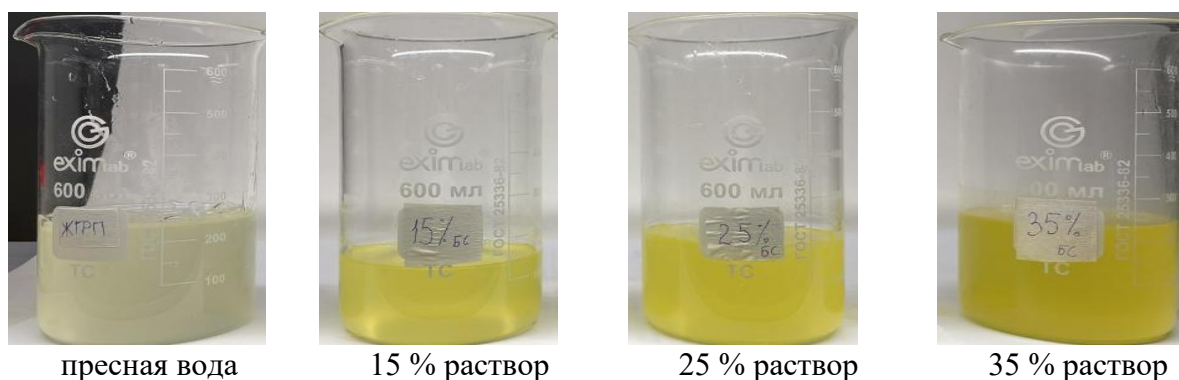


Рис. 1. Внешний вид жидкостей ГРП, приготовленных на пресной воде и бинарных термохимических составах разной концентрации

Обсуждение результатов

В работе были выполнены исследования, отражающие влияние бинарных солей на реологию жидкостей ГРП на гуаровой основе. Установлена возможность получения и стабильность системы во времени. Отсутствие влияния насыщающих солей на время сшивки системы при традиционных сшивающих системах (боратных сшивателях). Время закрытия воронки соответствует системе без бинарных солей. Результаты тестов позволили выявить стабильность системы только в 15 % по массе растворе бинарных солей, увеличение концентрации главным образом отражается на способности системы к восстановлению при исследованиях в ротационном режиме. Полученные реологические характеристики стабильности системы 15 % раствора при разных скоростях сдвига позволяют рекомендовать систему как стабильную (Табл. 2). Сшитые системы ЖГРП могут

удерживать пропант в течение более 4 часов без видимых признаков оседания, при концентрации не менее 800 кг/м^3 фракция пропанта 16/20 меш.

Наблюдается влияние ионов натрия на пересшивку растворов, которое требует уточнения, возможно данное явление позволит оптимизировать количество гелеобразователя (уменьшить). Кроме того, возможно увеличение плотности жидкости разрыва за счет насыщения бинарными солями, что, в свою очередь, может повлиять на значения устьевых давлений ГРП, т.е. снизить их кратно увеличению плотности раствора при создании гидростатического давления в среднем на 10-15 %.



Пресная вода ЖГРП, через 2 часа



Состав ТХС ЖГРП, через 2 часа

Рис. 2. Текучесть жидкости ГРП, приготовленных на пресной воде и 15 % бинарной термохимической композиции

Стандартные тесты на реологию предусматривали выполнение тестов на определение чувствительности к сдвигу при скорости сдвига на 511 с^{-1} и 100 с^{-1} вискозиметре OFITE 900. Результаты теста показаны на рис. 3, из которого видно, что гель ГРП на основе 15 % раствора БС, сшитый боратом, обладает хорошей эластичностью, прочностью и способностью быстро восстанавливать реологические свойства при больших изменениях скоростей сдвига, что говорит о сохранении целостности структуры.

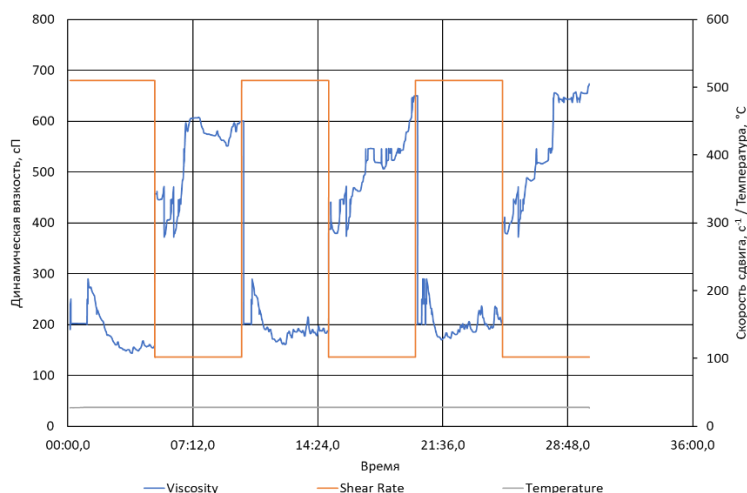


Рис. 3. Определение чувствительности к сдвигу при скоростях сдвига 511 с^{-1} и 100 с^{-1}

Исследуемый в работе ЖГРП показывает высокие показатели вязкости на основе 15 % раствора БС, который позволяет удерживать вязкость сшитого геля в течение требуемого времени. Флуктуации значения вязкости при переходе с одной скорости на другую в большей степени связаны с эффектом Вайсенберга.

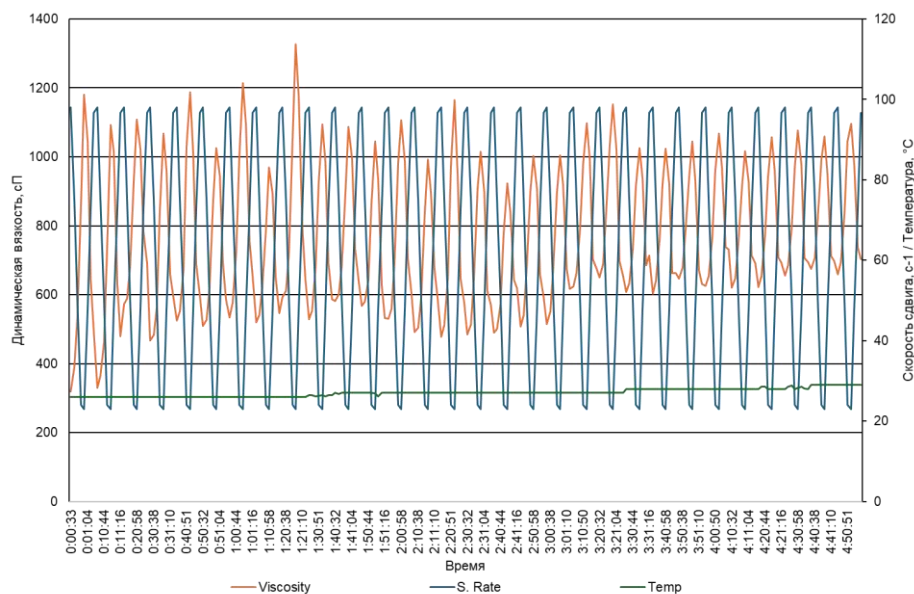


Рис. 4. Нагрузочный тест при скоростях сдвига 25, 50, 75, 100 с^{-1}

Система показала хорошее восстановление вязкости при изменении скорости сдвига (Рис. 4). При этом стоит отметить, что данная система является очень эластичной и дает возможность применять ее при различных

дизайнах ГРП, подбирая необходимые параметры. В течение 4 часов не наблюдается заметных изменений в вязкостных характеристиках системы. Получены диапазоны устойчивости гуаро-боратной системы жидкости ГРП с БС. Диапазоны устойчивых концентраций раствора БС для гуаро-боратной системы не должно превышать 15 % по насыщающим солям.

Проведена оценка разрушения гуаро-боратных систем в результате активации термохимической реакции. Установлена полная деструкция систем под действием увеличения температуры и подкисления среды с возможностью полного восстановления проницаемости породы за счет воздействия продуктов реакции.

Активация геля ГРП предусматривала закачку окислителя и оценку изменения температуры реакции в свободном объеме и степени деструкции геля ГРП при различном соотношении насыщения бинарного раствора. Результаты лабораторного моделирования показывают, что изменение насыщения ведет к линейному увеличению температуры реакции, но диапазон изменения температуры в 15 % растворе бинарной композиции может быть рекомендован для увеличения температуры, а фактическое повышение температуры даже в условиях интенсивного теплообмена с окружающей средой и малых объемов реагента может быть рекомендовано для фактического применения. Результаты тестов сведены в табл. 3.

Таблица 3

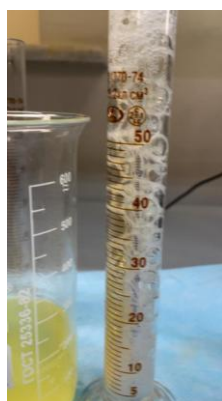
Температура разложения сшитого геля ГРП при взаимодействии с кислотным активатором (соляной кислотой с ПАВ)

Насыщенность раствора, %	Температура реакции, °С	Деструкция/жидкость/вязкость, мПа·с
15	73	Полная/Ньютоновская /1,1
25	78	Полная/Ньютоновская /1,1
35	83	Полная/Ньютоновская /1,1

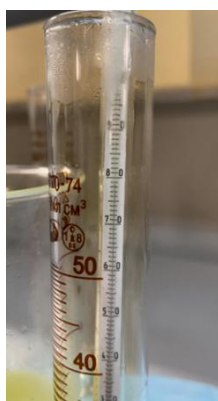
Иллюстрация протекания процесса на разных стадиях: активация с выделением газа и образованием пены, рост температуры и результат полной деструкции сшитой системы до Ньютоновской вязкости представлен на рис. 5.

Результаты активации геля ГРП кислотным активатором показывают, что деструкция происходит до ньютоновской жидкости, т.е. происходит полное деструктирование сшитого геля ГРП сопровождающееся образованием пены, достигающей кратности до 20 раз относительно первоначального объема жидкости, роста температуры с 20 °С до значений выше 70 °С за период нескольких секунд, распадом сшитой системы.

В условиях пропантной пачки идентификация процесса может быть как полная очистка трещины от жидкостей ГРП и воздействие на прилегающие участки пласта.



Фиксация образования пены и выделения газов



Фиксация температуры реакции 73°C



Фиксация продуктов реакции (Ньютоновская жидкость)

Рис. 5. Иллюстрация процесса деструкции геля ГРП при активации

Результаты изучения термодинамики процесса в условиях свободного теплообмена с окружающей средой при тестировании 1 мл активной бинарной композиции ГРП при активации кислотными составами, естественно, не отражает всю картину процессов в пласте, однако позволяют оценить общую перспективность данного направления работ и предложить его не только как вариант деструкции геля, но и как вариант активации RCP пропантанта.

В ходе выполнения работ были изучены возможности совершенствования активации термохимической жидкости гидроразрыва за счет использования в кислотных активаторах комплекса ПАВ. Изучение такой возможности предполагало генерацию пены для очистки порового пространства, освоение скважины за счет снижения гидростатики при образовании пены и в целом оценку свойств образующихся продуктов в свободном объеме. В качестве пенообразователя были протестированы коммерческие ПАВ в составе кислотных составов.

По результатам работ было установлено, что коммерческие системы на основе ВУПАВ обладают лучшими характеристиками по кратности пенообразования и устойчивости к разрушению во времени.

Результаты, иллюстрирующие тестирование образования в ходе реакции устойчивых пенных систем, при использовании ВУПАВ представлены на рис. 6.

Методика тестов предусматривала использование для тестирования 15 мл бинарной композиции и ее активацию кислотным составом, рассчитанным из условия эквимольного взаимодействия компонентов системы.

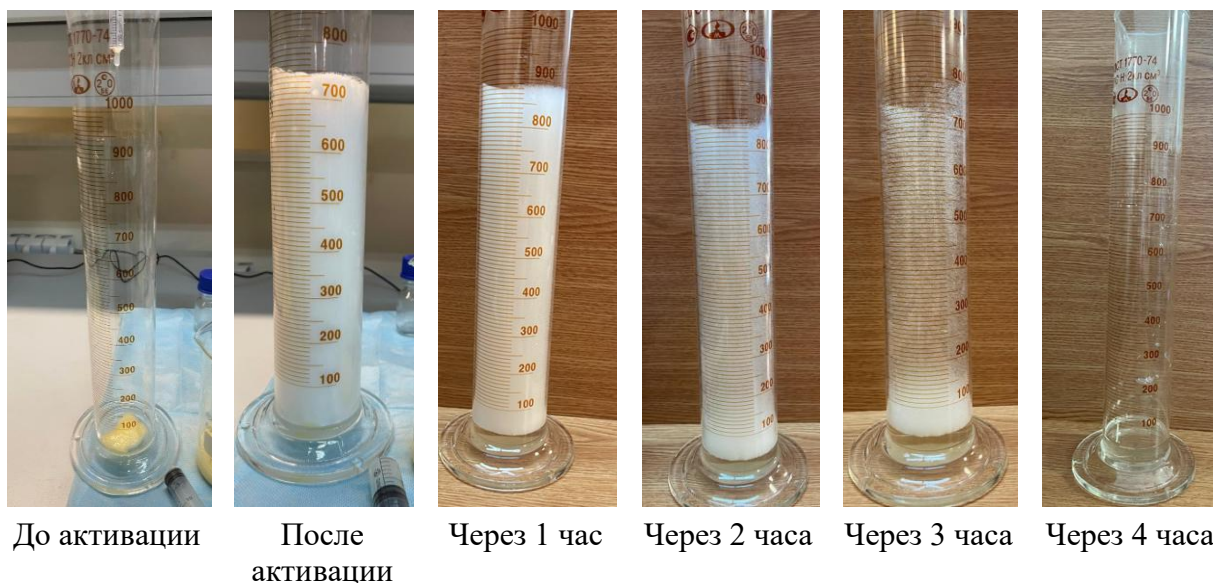


Рис. 6. Активация кислотным составом с содержанием ПАВ термохимической композиции ГРП с оценкой устойчивости образования пены

Согласно проведенным исследованиям, кратность образования пены, относительно суммарных объемов реагентов достигает значения 15-25 раз, устойчивость образующихся составов не менее 2 часов при тестах в свободном объёме. С увеличением времени наблюдается изменение структуры пены за счет утоньшения ламелей и слияния пузырьков газа.

Заключение

Проведенные лабораторные исследования свойств и особенностей применения жидкости гидроразрыва пласта (ГРП) с бинарной системой (БС) для низкотемпературных пластов позволили сделать следующие выводы:

Состав жидкости: Комбинация нитрита натрия и карбамида обеспечивает минимальное изменение рН жидкости ГРП и не оказывает существенного влияния на ее эксплуатационные характеристики в диапазоне концентраций 10–20 %.

Реологические свойства: Жидкость ГРП на основе 15 % БС, считая боратом, продемонстрировала высокую эластичность, прочность и способность к быстрому восстановлению реологических свойств при значительных изменениях скорости сдвига (511 с^{-1} и 100 с^{-1}).

Термическая активация: Использование кислотных активаторов позволяет инициировать экзотермическую реакцию, в ходе которой температура системы повышается с 20°C до значений выше 70°C . Это приводит к полной деструкции геля до состояния солевого раствора с вязкостью $1,1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Пенообразование: Применение устойчивых ВУПАВ в составе кислотных активаторов позволяет получать пенные системы с кратностью 15 – 25 и стабильностью более 2 часов.

Таким образом, результаты исследований подтверждают перспективность применения комбинированных термохимических жидкостей ГРП

на месторождениях с низкими пластовыми температурами. Их использование может решить проблемы полной деструкции геля, оказать дополнительное воздействие на прискважинную зону, обеспечить полный вынос жидкости при освоении скважины и создать условия для термозакрепления пропанта. Для успешного внедрения технологии необходима ее адаптация к конкретным пластовым условиям.

Несмотря на увеличение затрат, комбинация преимуществ жидкости ГРП и термохимической системы может значительно повысить продуктивность скважин и общую эффективность проведения ГРП

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030)

Список литературы

1. Загребельный Е., Мартынов М. Martynov M.; Эффективные методы гидроразрыва пласта в неглубоких слабосцементированных песчаниках с тяжелой нефтью // Конференция SPE по нефтегазовым технологиям в России. –2018. – С. 1-9. <https://doi.org/10.2118/191477-18RPTC-MS>.
2. Кулешов В.С., Павлов В.А., Леванов А.Н., Игнатьев Н.А., Черкасов С.Ф., Самойлов М.И., Хохлов Д.И., Нестеров П.В., Козырев А.А. Проведение гидравлического разрыва пласта на низкотемпературном карбонатном объекте // Экспозиция Нефть Газ. –2023. – № 6. – С. 39-46. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-6-39-46
3. Парфёнова Н.М., Косякова Л.С., Григорьев Е.Б., Шафиев И.М., Логинов В.А., Наренков Р.Ю., Кубанова М.М., Люгай А.Д. Нефтяной потенциал Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции // Вести газовой науки. –2021. – №2 (47). –С. 63-80. <https://cyberleninka.ru/article/n/neftyanoy-potentsial-leno-tungusskoy-neftegazonosnoy-provintsii> (дата обращения: 16.11.2024).
4. Косачук Г.П., Буракова С.В., Мельникова Е.В., Усенко А.Ю. Оценка факторов, влияющих на начальные термобарические условия Чаяндинского нефтегазоконденсатного месторождения // Вести газовой науки. –2016. –№2(26). – С. 19-27. – <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-faktorov-vliyayuschih-na-nachalnye-termobaricheskie-usloviya-chayandinskogo-neftegazokondensatnogo-mestorozhdeniya>
5. Фоломеев А.Е., Магадиев А.Ф., Хатмуллин А.Р., Таипов И.А., Вахрушев С.А., Галиев Т.Р., Мухаметов Ф.Х. Опыт термокислотного воздействия на низкотемпературные доломитизированные карбонатные коллектора, осложненные выпадением АСПВ // Конференция SPE по нефтегазовым технологиям в России. – 2020. – С. 1-30. <https://doi.org/10.2118/202069-MS>.
6. Аленькин И.А., Закиров Р.Р. Взаимовлияние жидкостей ГРП и технологических жидкостей // Нефтяная провинция. – 2024. – №1(37). С. 215-228. <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.215-228>

7. Фаттахов Г., Кулешова Л.С., Кочетков А.В., Галиуллина И.Ф., Андарьянов И.Г., Сафиуллина А.Р., Гизатуллин И.Р. Применение жидкого деструктора с подачей в поток при закачке смеси для гидроразрыва пласта // Серия конференций IOP: Материаловедение и инженерия. – 2020. – 952(1):012044. DOI: 10.1088/1757-899X/952/1/012044
8. Выломов Д.Д., Шульгин П.А., Шакиров Р.Р., Снохин А.А. Подбор альтернативной жидкости гидроразрыва пласта в условиях низкопроницаемого газового коллектора туронского яруса // Экспозиция Нефть Газ. – 2023. – № 2. – С. 56-61. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-56-61
9. Сафаров Ф.Э., Мамыкин А.А., Вежнин С.А., Телин А.Г. Технические решения для выполнения операций по термозакреплению РСР-проппанта и термореагентному воздействию на призабойные зоны пласта добывающих скважин // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. – 2022. – Том 4, №1. – С. 73-82.
10. Летичевский А., Парфенов А., Белякова Л., Конченко А., Борисенко А., Пархонюк С., Оленникова О., Клубин А. (2015). Контроль обратного выноса проппанта при гидроразрыве низкотемпературных пластов России: методология и практические примеры // Конференция SPE по нефтегазовым технологиям. – 2015. – С. 1-15. <https://doi.org/10.2118/176650-MS>.
11. Аль-Гадбан Х., Матар О., Аль-Дурази Х., Эль-Себаи М., Кадир В., Шаржуа К., Семари М. Решения для предотвращения обратного выноса проппанта в низкотемпературных условиях: успешное применение в крупном проекте стимуляции месторождения Бахрейн // Абу-Дабийская международная нефтяная выставка и конференция. – 2020. <https://doi.org/10.2118/202797-MS>.
12. Кустышев А.В., Калинин В.Р., Козлов Е.Н. Применение цилиндрического проппанта при гидроразрыве пласта: преимущества технологии, пути дальнейшего развития // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации) / – 2014. – С. 86-91.
13. Аль-Так, А.А.; Аль-Джавад, М.С.; Аладе, О.С.; Аджавад, Х.М.; Абу-Хамсин, С.А.; Патил, Ш.; Махмуд, М. Эмульгирование и контроль pH для управления реакционной способностью термохимических жидкостей. // *Molecules*. – 2024. – Т. 29. – С. 1-16. DOI: 10.3390/molecules29225252
14. Тарьк З. Экспериментальное исследование снижения давления разрыва высокопрочных пород с использованием нового термохимического метода гидроразрыва // *Geofluids*. – 2019. – Т. №.1. – С. 190-198. <https://doi.org/10.1155/2019/1904565>
15. Хамед А.Г., Омар М., Аль-Дурази Х. Решения по обратному притоку проппанта для низкотемпературных применений доказали свою эффективность в крупном проекте интенсификации притока на месторождении Бахрейн // Конференция: Международная нефтяная выставка и конференция в Абу-Даби. – 2020. – С. 1-19. DOI:10.2118/202797-MS.
16. Али Абдулла Аль-Так; Муртада С.А.; Базиль М.А.; Саджад С.А. Термохимические жидкости: перспективная технология повышения эффективности работы брейкеров и максимальной очистки жидкостей гидроразрыва пласта // Международная конференция и выставка SPE по технологиям гидроразрыва пласта. – 2023. <https://doi.org/10.2118/215711-MS>.
17. Крисмартопо В.Д., Нотман Л., Критзлер Л., Кристанто Т., Нгуен П. Улучшение конструкции гидроразрыва пласта путем применения метода снижения обратного выноса проппанта при добыче углеводородов // Азиатско-Тихоокеанская нефтегазовая конференция и выставка SPE. – 2005. –Р. 1-12. <https://doi.org/10.2118/93168-MS>.

References

1. Zagrebelnyy E.; Martynov M.; Konopelko A.; Kazakov E. Successful Hydraulic Fracturing Techniques in Shallow Unconsolidated Heavy Oil Sandstones // SPE Russian Petroleum Technology Conference/ – 2018. P. 1-9. <https://doi.org/10.2118/191477-18RPTC-MS>. (in Russian)
2. Kuleshov V.S., Pavlov V.A., Levanov A.N., Ignatiev N.A., Cherkasov S.F., Samoilov M.I., Khokhlov D.I., Nesterov P.V., Kozyrev A.A. Hydraulic Fracturing in a Low-Temperature Carbonate Formation // Ekspozitsiya Neft' Gaz [Oil and Gas Exposition]. – 2023. – № 6. – P. 39-46. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-6-39-46 (in Russian)
3. Parfenova N. M., Kosyakova L. S., Grigoriev E. B., Shafiev I. M., Loginov V. A., Narenkov R. Yu., Kubanova M. M., Lyugai A. D. Oil Potential of the Lena-Tunguska Petroleum Province // Vestnik Gazovoy Nauki [Bulletin of Gas Science]. –2021. –2 (47). – P. 63-80. <https://cyberleninka.ru/article/n/neftyanoy-potentsial-leno-tungusskoy-neftegazonosnoy-provintsii> (дата обращения: 16.11.2024). (in Russian)
4. Kosachuk G. P., Burakova S. V., Melnikova E. V., Usenko A. Yu. Assessment of Factors Affecting Initial Thermobaric Conditions of the Chayandinskoye Oil and Gas Condensate Field // Vestnik Gazovoy Nauki [Bulletin of Gas Science]. –2016. – №2(26). – P. 19-27. – <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-faktorov-vliyayuschih-na-nachalnye-termobaricheskie-usloviya-chayandinskogo-neftegazokondensatnogo-mestorozhdeniya> (in Russian)
5. Folomeev A.E.; Magadiev A.F.; Khatmullin A.R.; Taipov I.A.; Vakhrushev S.A.; Galiev T.R.; Mukhametov F.K. (2020). Acidizing Combined with Heat Generating System in Low-Temperature Dolomitized Wax Damaged Carbonates // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – 2020. – P. 1-30. <https://doi.org/10.2118/202069-MS>
6. Alenkin I.A., Zakirov R.R. (2024). Interference Between Fracturing Fluids and Technical Fluids. Neftyanaya Provintsiya. –2024. – №1(37). – P. 215-228. <https://doi.org/10.25689/NP.2024.1.215-228>. (in Russian)
7. Churakov A.V., Pichugin M.N., Gorbachev Ya.I., Musin O.T., Kayukov K.A. (2024). Efficiency Improvement of Hydraulic Fracturing in Mature Fields // Vestnik Neftgazovoy Ot-rasli Kazakhstana [Bulletin of the Oil and Gas Industry of Kazakhstan]. – 2024. – Vol. 6(2). – P. 50–60. <https://doi.org/10.54859/kjogi108722>. (in Russian)
8. Fattakhov G., Kuleshova L.S., Kochetkov A.V., Galiullina I.F., Andaryanov I.G., Safiullina A.R., Gizatullin I.R. (2020). The use of a liquid destructor with flow into the stream during the injection of the fracturing mixture // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – 952, 012044. doi:10.1088/1757-899X/952/1/012044
9. Vylomov D.D., Shulgin P.A., Shakirov R.R., Snokhin A.A. Selection of an Alternative Hydraulic Fracturing Fluid for a Low-Permeability Gas Reservoir of the Turonian Stage // Ekspozitsiya Neft' Gaz [Oil and Gas Exposition]. – 2023. – No. 2. – P. 56-61. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-56-61. (in Russian)
10. Safarov F.E., Mamykin A.A., Vezhnin S.A., Telin A.G. Technical Solutions for Thermocuring of RCP Proppant and Thermo-Reagent Impact on the Bottomhole Formation Zone of Production Wells // Vestnik Neftgazovoy Otrastli Kazakhstana [Bulletin of the Oil and Gas Industry of Kazakhstan]. – 2022. – Vol. 4, No. 1. – P. 73-82. (in Russian)
11. Letichevskiy A., Parfenov A., Belyakova L., Konchenko A., Borisenko A., Parkhonyuk S., Olennikova O., Klyubin A. (2015). Proppant Flowback Control in Hydraulic Fracturing of Russia's Low-Temperature Formations: Methodology and Case Studies // SPE Oil and Gas Technology Conference. – 2015. – P. 1-15. <https://doi.org/10.2118/176650-MS>
12. AlGhadhban H., Matar O., AlDurazi H., ElSebaee M., Qadir W., Chargois C., Semary M. Proppant Flowback Solutions for Low-Temperature Applications Proves Success in Large Stimulation Project of Bahrain Field // APIDEC. <https://doi.org/10.2118/202797-MS>

13. Kustyshev A.V., Kalinin V.R., Kozlov E.N. Application of Rod-Shaped Proppant in Hydraulic Fracturing: Advantages of the Technology and Ways for Further Development. *Geologiya i Neftegazonosnost' Zapadno-Sibirskogo Megabasseyina (Opyt, Innovatsii)* // [Geology and Oil and Gas Potential of the West Siberian Megabasin: Experience and Innovations]. – 2014. – С. 86-91. (in Russian)
14. Al-Taq, A.A.; Aljawad, M.S.; Alade, O.S.; Ajwad, H.M.; Abu-Khamsin, S.A.; Patil, S.; Mahmoud, M. Emulsification and pH Control for Sustainable Thermochemical Fluids Reactivity // *Molecules*. – 2024. – V.29(5252). – P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/molecules29225252>.
15. Tariq Z. An experimental study to reduce the fracture pressure of high strength rocks using a novel thermochemical fracturing approach // *Geofluids*. – 2019. – V. 2019. – №. 1. – P. 190-198. <https://doi.org/10.1155/2019/1904565>
16. H. AlGhadhban, Matar O., Hassan Al., ElSebae M., Qadir W., Chargois Ch., and Semaary M. Proppant Flowback Solutions for Low-Temperature Applications Proves Success in Large Stimulation Project of Bahrain Field // Paper presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE. – 2020. – P. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.2118/202797-MS>
17. Krismartopo B. D., Notman L., Kritzer T., Kristanto T., Nguyen P. A Fracture Treatment Design Optimization Process To Increase Production and Control Proppant Flowback for Low-Temperature, Low-Pressure Reservoirs // *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. – 2005. – P. 1-12. <https://doi.org/10.2118/93168-MS>

Сведения об авторах

Маннанов Ильдар Илгизович, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-5853-0205>
E-mail: ildarmannanov@mail.ru

Ганиева Гузель Рафиковна, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2892-7428>
E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

Аникин Олег Викторович, кандидат химических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7155-8517>
E-mail: OlVAnikin@kpfu.ru

Тазеев Айдар Ринатович, младший научный сотрудник, б/с, НИЛ Внутрипластовое горение, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Большая Красная, 4
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-9529-5395>
E-mail: AydRTazeev@kpfu.ru

Минханов Ильгиз Фаильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, 4/5
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-8625-6688>
E-mail: minkhanovi@mail.ru

Authors

I.I. Mannanov, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya St., Kazan, 420111, Russian Federation
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-5853-0205>
E-mail: ildarmannanov@mail.ru

G.R. Ganieva, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya St., Kazan, 420111, Russian Federation
ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-2892-7428>
E-mail: gguzelrafikovna@mail.ru

O.V. Anikin, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya St., Kazan, 420111, Russian Federation
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-7155-8517>
E-mail: OlVAnikin@kpfu.ru

A.R. Tazeev, Junior Researcher, b/s, Research Laboratory In-situ Combustion, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4, Big Red St., Kazan, 420111, Russian Federation
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0002-9529-5395>
E-mail: AydRTazeev@kpfu.ru

I.F. Minhanov, Ph.D., Associate Professor, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbon Deposits, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University
4/5, Kremlevskaya St., Kazan, 420111, Russian Federation
ORCID ID <http://orcid.org/0000-0001-8625-6688>
E-mail: minkhanovi@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.09.2025
Принята к публикации 15.12.2025
Опубликована 30.12.2025