ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru




*Научная статья* *Геотехнология и инженерная геология*

# Влияние сезонных изменений физико-химических свойств пресной воды на реологические характеристики жидкостей для гидроразрыва пласта (на примере Альметьевского района Республики Татарстан)

**И.А.Аленькин**[1]✉, **А.В.Насыбуллин**[1], **А.В.Кочетков**[2], **Р.Р.Закиров**[1], **Т.Л.Гайфуллин**[1], **Р.Р.Сахибгараев**[2]

[1] *Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*

[2] *ПАО «Татнефть» им. В.Д.Шашина, Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*

***Как цитировать эту статью***: Аленькин И.А., Насыбуллин А.В., Кочетков А.В., Закиров Р.Р., Гайфуллин Т.Л., Сахибгараев Р.Р. Влияние сезонных изменений физико-химических свойств пресной воды на реологические характеристики жидкостей для гидроразрыва пласта (на примере Альметьевского района Республики Татарстан) // Записки Горного института. 2026. Т. 278. С. 67-76. EDN FWJJBO

***Аннотация***

В работе исследовано влияние сезонных изменений состава пресной воды на реологические характеристики гуаро-боратных жидкостей гидроразрыва пласта. В октябре 2024 – августе 2025 гг. проводился ежемесячный отбор проб из трех источников Республики Татарстан с анализом pH (7,3-7,9), щелочности (73-275 мг/л $HCO_3^-$), общей жесткости (180-520 мг/л $Ca^{2+}$+$Mg^{2+}$), хлоридов (42-284 мг/л), сульфатов (61-146 мг/л) и ионов железа (0,1-0,3 мг/л). На этих водах готовились жидкости разрыва, которые испытывались на реометре высокого давления Brookfield PVS при 32 °C в соответствии с ISO 3219:1993; ориентировочный диапазон требуемой вязкости составлял 400-700 мПа·с. Установлено, что в воде с высокой минерализацией (источник № 2, средняя жесткость ~419 мг/л, $Cl^-$>180 мг/л) вязкость геля снижалась на 10-15 %, увеличивалось время восстановления до рабочей вязкости и ускорялась деструкция, что повышало риск преждевременного осаждения пропанта. Корреляционный анализ показал, что для «мягких» источников № 1 и 3 характерны сильные положительные связи между жесткостью, хлоридами, сульфатами и щелочностью ($r$ = 0,53-0,90), тогда как в минерализованной воде № 2 они ослаблены ($r$ = 0,17-0,51). Результаты демонстрируют, что сезонный рост минерализации (зимне-весенний период) существенно ухудшает реологическую устойчивость жидкостей гидроразрыва пласта, и подчеркивают необходимость обязательного мониторинга состава воды и адаптации рецептур в периоды пиков минерализации.

***Ключевые слова***

гидроразрыв пласта; жидкости гидроразрыва; гуаровые растворы; боратные сшиватели; реологические свойства; качество воды; деструкция геля; восстановление вязкости; эффективность размещения пропанта

***Поступила: 10.06.2025*** ***Принята: 09.12.2025*** ***Онлайн: 19.03.2026*** ***Опубликована: 12.05.2026***

## Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одной из наиболее эффективных технологий для интенсификации добычи углеводородов [1-3]. Данная технология требует значительных технических и материальных ресурсов, которые зависят от особенностей конкретного геологического объекта [4]. С развитием более сложных геологических объектов технология ГРП продолжает совершенствоваться, что влечет за собой рост потребления пресной воды для подготовки жидкостей разрыва, а также увеличивает потребность в химических реагентах и технологическом оборудовании [5-7].

Использование пресной воды в качестве основы технологической жидкости разрыва является мировым стандартом. Это связано с ее оптимальными характеристиками, которые обеспечивают высокую эффективность и стабильность процесса, не ухудшая коллекторские свойства пласта и реологические свойства жидкостей. В то же время использование такой воды требует значительных



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

затрат [8], в том числе транспортных и временных, особенно в зимний и осенний период. Это побуждает искать альтернативные источники [9, 10], но на практике пресная вода по-прежнему является наиболее предпочтительным выбором для ГРП [11-13].

Источниками пресной воды, как правило, являются природные водные объекты. Такая вода подвержена сезонным колебаниям физико-химического состава, что может существенно повлиять на эффективность проведения операции. Состав воды изменяется в зависимости от времени года, это обусловлено рядом факторов, включая таяние снега, интенсивность осадков, температурные колебания и изменения в биологической активности водоемов [14-16].

Известно, что водоемы демонстрируют сезонные колебания минерализации и жесткости [17, 18]. Например, в Куйбышевском и Нижнекамском водоемах зимой и весной минерализация может значительно увеличиваться, а жесткость снижаться летом [19]. Высокая минерализация воды может оказывать значительное влияние на реологические свойства полисахаридного геля, снижая его эффективную вязкость [20-22].

Сезонные изменения температуры воды влияют на ее физико-химические свойства [23-25]. Например, в летний период повышенная температура может снижать растворимость солей, что обусловлено повышением кинетической энергии молекул воды, улучшением диффузии и снижением вязкости раствора. Это может приводить к увеличению минерализации воды и изменению ее химического состава. Весной наблюдается увеличение биологической активности в водоемах, вызывающее повышение содержания органических веществ и изменение pH воды. Эти изменения могут влиять на стабильность жидкостей ГРП и требуют применения дополнительных стабилизирующих добавок [26-29].

Учитывая сезонные колебания состава пресной воды, необходимо проводить регулярный мониторинг ее качества и адаптировать состав жидкостей ГРП в зависимости от текущих характеристик воды. Это позволит поддерживать эффективность операции и минимизировать риски, связанные с изменением свойств жидкости разрыва.

В работе проводится анализ изменений физико-химических свойств пресной воды в зависимости от сезона и установление их влияния на реологические свойства жидкостей разрыва.

**Методы**

Для проведения исследований была выбрана пресная вода из трех региональных источников, которые используются для приготовления жидкостей ГРП на территории Республики Татарстан. Ежемесячно отбирались пробы воды и проводился физико-химический анализ с использованием тест-наборов HACH. В ходе анализа определены следующие показатели: водородный показатель pH, щелочность по $HCO_3^-$, содержание хлоридов $Cl^-$, сульфатов $SO_4^{2-}$, ионов кальция $Ca^{2+}$ и магния $Mg^{2+}$ (общая жесткость), ионов железа $Fe^{2+}$.

Реологические исследования проводились в соответствии со стандартом ISO 3219:1993. Ключевые реологические характеристики определялись тестами на чувствительность к сдвигу (имитация движения жидкости по насосно-компрессорным трубам (НКТ) с последующим движением по пласту-коллектору) и тестами на скорость разрушения сшитой системы. Исследования проводились с помощью реометров высокого давления Brookfield PVS при температуре 32 °C. С целью повышения точности исследований тесты на чувствительность к сдвигу проводились по два раза для каждого образца. Основные определяемые параметры реологических тестов – время восстановления динамической вязкости после снятия сдвиговой нагрузки, скорость разрушения системы.

**Результаты физико-химического анализа воды**

Результаты анализа воды представлены в табл.1-3. Начало исследований – октябрь 2024 г. Несмотря на то, что сезонные изменения параметров воды из источника № 1 по величине невысоки, именно такие колебания оказывают существенное влияние на формирование и устойчивость гуаро-боратного геля. Повышение жесткости и минерализации даже на 50-100 мг/л снижает максимальную вязкость на 10-15 % и ускоряет деструкцию, что критично для эффективного размещения пропанта и сохранения трещины после ГРП.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Таблица 1*

**Результаты физико-химического анализа пресной воды из источника № 1**

| Время от первой пробы, дни | pH | $HCO_3^-$, мг/л | $Cl^-$, мг/л | $SO_4^{2-}$, мг/л | $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$, мг/л | $Fe^{2+}$, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 7,65 | 94,3 | 80,2 | 85,4 | 184,5 | 0,2 |
| 24 | 7,48 | 101,3 | 93,5 | 91,2 | 193,7 | 0,1 |
| 57 | 7,61 | 105,2 | 101,4 | 88,6 | 201,2 | 0,1 |
| 74 | 7,71 | 100,4 | 103,2 | 104,4 | 218,4 | 0,2 |
| 123 | 7,68 | 183 | 102,9 | 122,8 | 250,25 | 0,1 |
| 148 | 7,74 | 146,4 | 81,6 | 85,5 | 210,2 | 0,1 |
| 173 | 7,94 | 122 | 71 | 76,8 | 180,18 | 0,2 |
| 203 | 7,45 | 85,4 | 49,7 | 76,8 | 140,14 | 0,1 |
| 231 | 7,54 | 103,7 | 53,5 | 76,8 | 155,16 | 0,2 |
| 267 | 7,52 | 128,1 | 49,7 | 61,44 | 150,15 | 0,1 |
| 285 | 7,61 | 111,2 | 54,4 | 91,2 | 171,5 | 0,2 |

*Таблица 2*

**Результаты физико-химического анализа пресной воды из источника № 2**

| Время от первой пробы, дни | pH | $HCO_3^-$, мг/л | $Cl^-$, мг/л | $SO_4^{2-}$, мг/л | $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$, мг/л | $Fe^{2+}$, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 7,62 | 208,4 | 201,8 | 114,4 | 400,4 | 0,1 |
| 24 | 7,71 | 201,6 | 205,7 | 95,4 | 394,2 | 0,1 |
| 57 | 7,78 | 193,2 | 195,4 | 114,4 | 511,4 | 0,2 |
| 74 | 7,82 | 224 | 213,6 | 98,6 | 496,5 | 0,1 |
| 123 | 7,42 | 274,6 | 282,22 | 145,9 | 520 | 0,1 |
| 148 | 8 | 244 | 284 | 84,48 | 400,4 | 0,1 |
| 173 | 7,66 | 198,24 | 181,1 | 107,5 | 395,4 | 0,1 |
| 203 | 7,9 | 224 | 191,7 | 92,16 | 305,4 | 0,1 |
| 231 | 7,61 | 244 | 213 | 115,2 | 384 | 0,2 |
| 267 | 7,45 | 231,8 | 209,45 | 122,88 | 395,39 | 0,1 |
| 285 | 7,66 | 213 | 201 | 105,4 | 401,5 | 0,1 |

*Таблица 3*

**Результаты физико-химического анализа пресной воды из источника № 3**

| Время от первой пробы, дни | pH | $HCO_3^-$, мг/л | $Cl^-$, мг/л | $SO_4^{2-}$, мг/л | $Mg^{2+}$, $Ca^{2+}$, мг/л | $Fe^{2+}$, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 7,52 | 105,4 | 76,4 | 84,5 | 130,2 | 0,2 |
| 24 | 7,62 | 111,2 | 82,5 | 97,4 | 155,7 | 0,2 |
| 57 | 7,58 | 140,3 | 91,4 | 101,5 | 184,2 | 0,3 |
| 74 | 7,68 | 122,6 | 88,4 | 96,7 | 206,7 | 0,2 |
| 123 | 7,65 | 122,2 | 95,8 | 122,9 | 293 | 0,3 |
| 148 | 7,66 | 140,3 | 78,1 | 84,5 | 205,2 | 0,3 |
| 173 | 7,86 | 125 | 85 | 99,84 | 170,2 | 0,3 |
| 203 | 7,25 | 73,2 | 42 | 76,8 | 135,14 | 0,3 |
| 231 | 7,45 | 122 | 42,6 | 96 | 177,6 | 0,2 |
| 267 | 7,41 | 103,7 | 46,15 | 69,12 | 130,13 | 0,2 |
| 285 | 7,45 | 110,5 | 52,1 | 76,8 | 177,6 | 0,3 |

Источник № 1 (Камская вода) – забор из русловой части Камы в верхнем течении; вода преимущественно гидрокарбонатно-кальциевая, низкой минерализации, жесткость невысокая (около 180-200 мг/л по $Ca^{2+}$+$Mg^{2+}$). Характерна выраженная сезонная изменчивость (весенний паводок → снижение минерализации, лето – осень → рост за счет испарения и стока).

Источник № 2 (Карабашское водохранилище) – поверхностный водоем накопительного типа, формирующийся за счет речного стока и атмосферного питания. Вода хлоридно-сульфатно-



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

кальциево-магниевая, минерализованная, с повышенной жесткостью (в среднем 420 мг/л), относительно стабильного состава в течение года, но изначально содержит высокие концентрации $Cl^-$ и $SO_4^{2-}$.

Источник № 3 (Камская вода) – забор из Камы ниже по течению (другой створ), состав аналогичен источнику № 1 (гидрокарбонатно-кальциевая, минерализация невысокая), фиксируется сезонная динамика, связанная с поверхностным стоком и гидрологическим режимом реки.

Результаты физико-химического анализа воды показали, что вода из источника № 2 заметно отличается высокой минерализацией. Например, средняя жесткость воды из источника № 2 в течение года составляет 419 мг/л, в то время как у воды из источников № 1, 3 данный показатель составляет 180-190 мг/л. Максимальные значения жесткости воды (около 520 мг/л) из источника № 2 наблюдаются в переходный зимне-весенний сезон. Можно отметить, что в целом вода из источников № 1 и 3 по составу близка друг к другу. Водородный показатель воды всех источников в течение года остается в диапазоне 7,3-7,9.

Водородный показатель и содержание железа можно считать стабильными параметрами, поскольку они изменяются незначительно и коэффициент вариации для них составляет около 5 и 30 % (pH изменяется в пределах 0,5, а железо в пределах 0,1-0,2 мг/л). Переменными параметрами можно считать щелочность, жесткость, содержание хлоридов и сульфатов, поскольку изменение данных показателей сильно варьируется, особенно у воды из источника № 2. На рис.1 представлена динамика изменения содержания различных компонентов в воде в зависимости от времени года.

Анализируя результаты исследований, можно увидеть, что среда у всех источников воды в течение года остается слабощелочной, однако летом pH немного снижался (рис.1, *д*). Возможно, это связано с увеличением биологической активности [30]. Динамика изменения pH в целом коррелирует с щелочностью (рис.1, *а*), особенно заметно у источника № 3. При снижении щелочности буферная емкость воды падает, что может приводить к небольшому снижению pH.

Щелочность возрастает весной и снижается летом. Например, у источника № 1 щелочность поднимается от 105,2 мг/л в феврале до 183 мг/л в апреле, затем падает в два раза к июлю и снова растет осенью. Похожий результат показывает физико-химический анализ источника № 3. Источник № 2 также обладает максимальной щелочностью весной, однако показатели летом остаются довольно высокими и не демонстрируют такого же резкого падения, как у других источников. Максимальные значения $HCO_3^-$ могут быть связаны с поступлением талых вод, вымывающих карбонатные соединения из почвы [31].

Общая жесткость (рис.1, *б*) для всех источников доходит до максимальных значений в конце зимы – начале весны, а летом вода существенно смягчается. При этом мягкой можно считать воду, которая входит в диапазон до 75 мг/л по $CaCO_3$, средней жесткости – до 150-160 мг/л. Источник № 2 отличается более высокой жесткостью на протяжении всего года. Возможно, снижение показателей летом связано с осаждением карбонатов при нагреве воды, а также разбавлением дождями.

Содержание хлорид-ионов (рис.1, *в*) следует схожему паттерну. У менее минерализованных источников № 1 и 3 содержание хлоридов максимально в холодный период и снижается летом. Затем к осени наблюдается возрастание. В источнике № 2 хлориды остаются стабильно высокими относительно других. При этом абсолютный уровень в два-три раза выше, чем у других источников, что, возможно, указывает на примесь минерализованных грунтовых вод.

Концентрация сульфат-ионов ($SO_4^{2-}$) меняется в целом аналогично хлоридам и жесткости (рис.1, *г*). Для всех источников характерен весенний максимум и значительное снижение к концу лета. У источника № 1 содержание сульфатов возрастает от 85 мг/л зимой до 122,8 мг/л в апреле, затем падает до 61 мг/л в сентябре (в два раза). У источника № 3 максимум значений в апреле и минимум в сентябре. В источнике № 2 пик 145,9 мг/л в апреле сменяется падением до 84,5 мг/л в мае, что может быть связано с интенсивными осадками. Дальнейшие летние значения источника № 2 находятся в диапазоне 92-115 мг/л, а к осени поднимаются до 122 мг/л.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

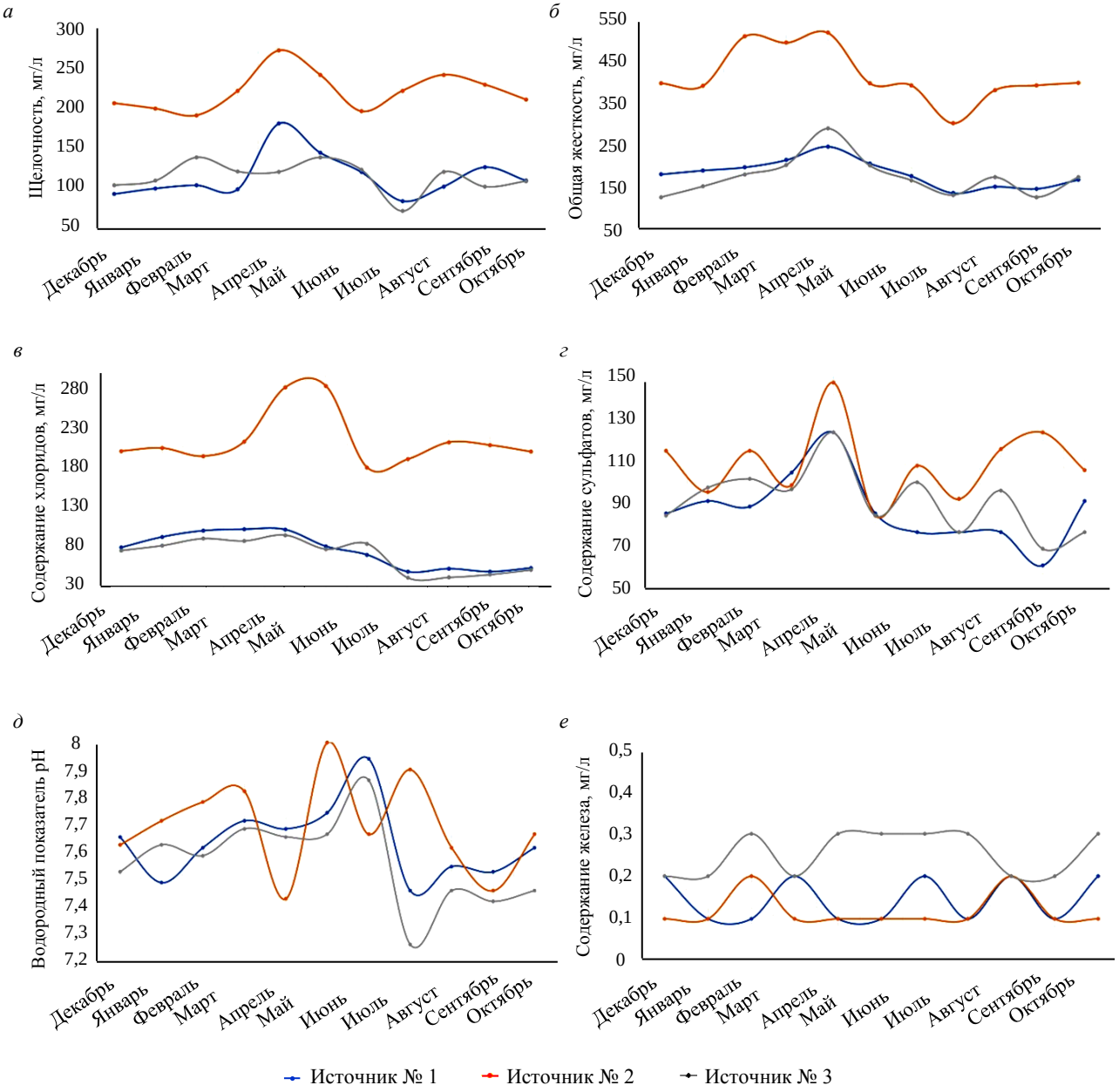



Рис.1. Динамика изменения физико-химического состава исследуемой воды: *а* – щелочность ($HCO_3^-$); *б* – общая жесткость ($Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$); *в* – хлориды ($Cl^-$); *г* – сульфаты ($SO_4^{2-}$); *д* – pH; *е* – железо ($Fe^{2+}$)

Содержание растворенного железа (рис.1, *е*) в исследованных водах относительно невелико и в течение года менялось незначительно. У источников № 1 и 2 железо стабильно удерживалось на уровне 0,1-0,2 мг/л без выраженной сезонности. У источника № 3 отмечены немного повышенные концентрации летом (0,3 мг/л в феврале-июле и 0,2 мг/л осенью и зимой). Тем не менее, абсолютные величины $Fe^{2+}$ очень низкие и вряд ли могут вызвать непосредственные технологические проблемы. Существенных корреляций содержания железа с другими параметрами не выявлено, т.е. колебания $Fe^{2+}$ происходят независимо от общей минерализации воды.

*Корреляционный анализ показателей.* Для выявления связей между параметрами рассчитан коэффициент корреляции Пирсона [32] по выборке в целом и по каждому источнику (рис.2). В качестве критерия значимости корреляции приведено значение *p-value*. Общая тенденция: в источниках с более мягкой водой (№ 1 и 3) большинство неорганических компонентов изменяются почти синхронно, тогда как в минерализованной воде источника № 2 взаимосвязи ослаблены.



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

*Записки Горного института.* 2026. Т. 278. С. 67-76
© И.А.Аленькин, А.В.Насыбуллин, А.В.Кочетков, Р.Р.Закиров,
Т.Л.Гайфуллин, Р.Р.Сахибгараев, 2026

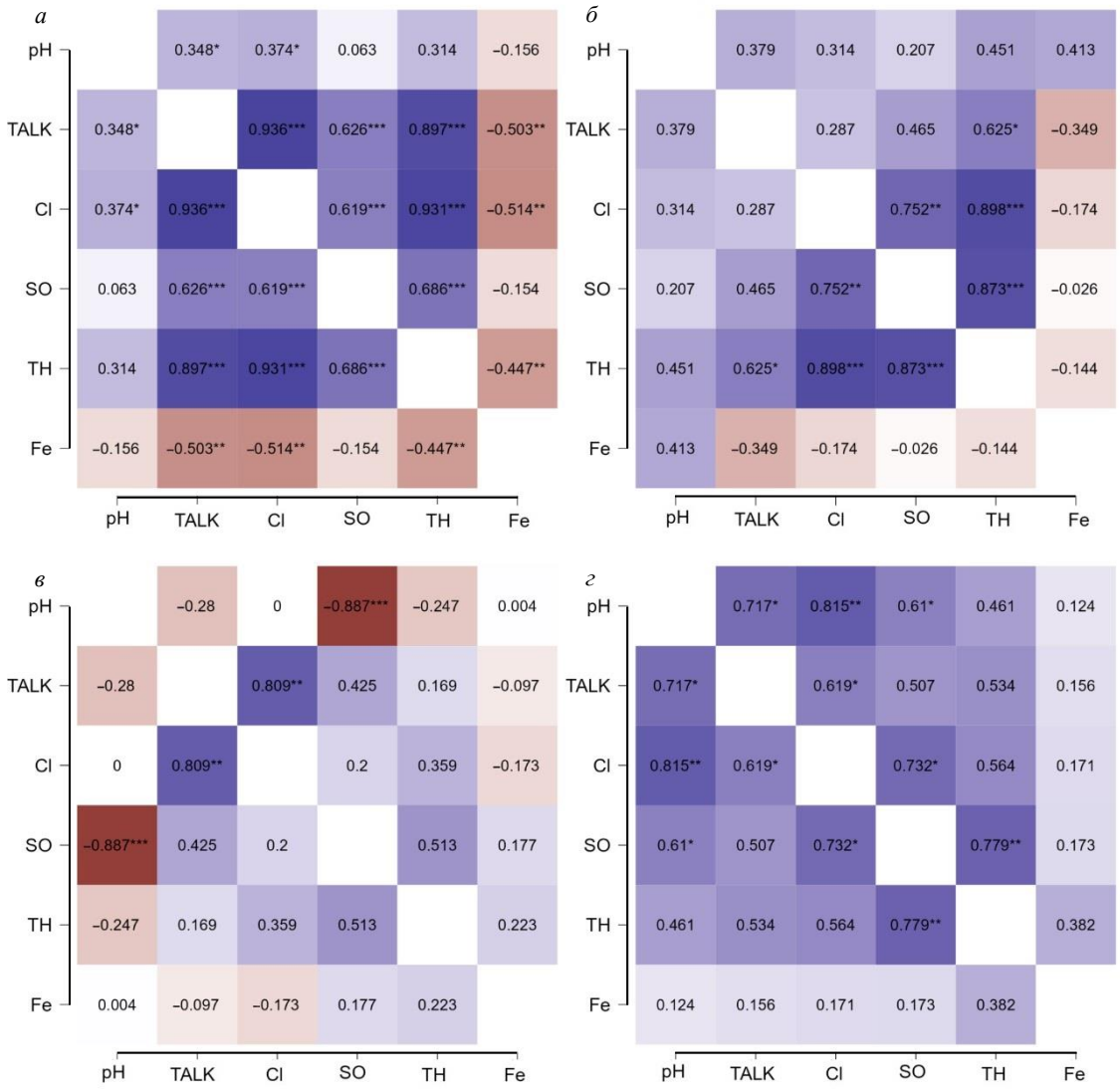



Рис.2. Корреляция Пирсона для параметров воды: *а* – по всей выборке; *б* – источник воды № 1; *в* – источник воды № 2; *г* – источник воды № 3
* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; TALK (Total Alkalinity) – общая щелочность

У источников № 1 и 3 наблюдается умеренная положительная корреляция между жесткостью и щелочностью ($r$ = 0,53-0,62). Это указывает на то, что основным вкладом в общую жесткость являются бикарбонатные соли кальция и магния. В источнике № 2 эта связь слабая ($r$ = 0,17), что может говорить о более комплексном составе. Скорее всего, жесткость там повышают другие анионы (сульфаты, хлориды), а доля бикарбонатов меньше.

Вода источников № 1 и 3 показывает очень высокую корреляцию жесткости с хлоридами ($r$ = 0,90) и сульфатами ($r$ = 0,78-0,87), т.е. при увеличении общей минерализации одновременно возрастает содержание ионов $Ca^{2+}$ и $Mg^{2+}$, $Cl^-$ и $SO_4^{2-}$. Получается, что все растворенные соли ведут себя как единый блок и зависят от степени разбавления воды. В источнике № 2 эти корреляции ниже ($r$ = 0,36 для $Cl^-$, $r$ = 0,51 для $SO_4^{2-}$). Это показывает, что изменения жесткости не полностью определяются изменениями хлоридов и сульфатов. Например, весной в источнике № 2 жесткость сильно выросла (превышает 500 мг/л), тогда как хлориды увеличились не столь существенно, вероятно, из-за притока мягкой воды.

В источниках № 1 и 3 хлориды и сульфаты изменяются синхронно ($r$ = 0,75), тогда как в источнике № 2 между ними практически отсутствует корреляция ($r$ = 0,20). Это подразумевает различие в происхождении этих солей, возможно, в источнике № 2 часть сульфатов поступает отдельно (например, из гипсовых пластов) и может осаждаться независимо от хлоридов.


*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

© И.А.Аленькин, А.В.Насыбуллин, А.В.Кочетков, Р.Р.Закиров, Т.Л.Гайфуллин, Р.Р.Сахибгараев, 2026

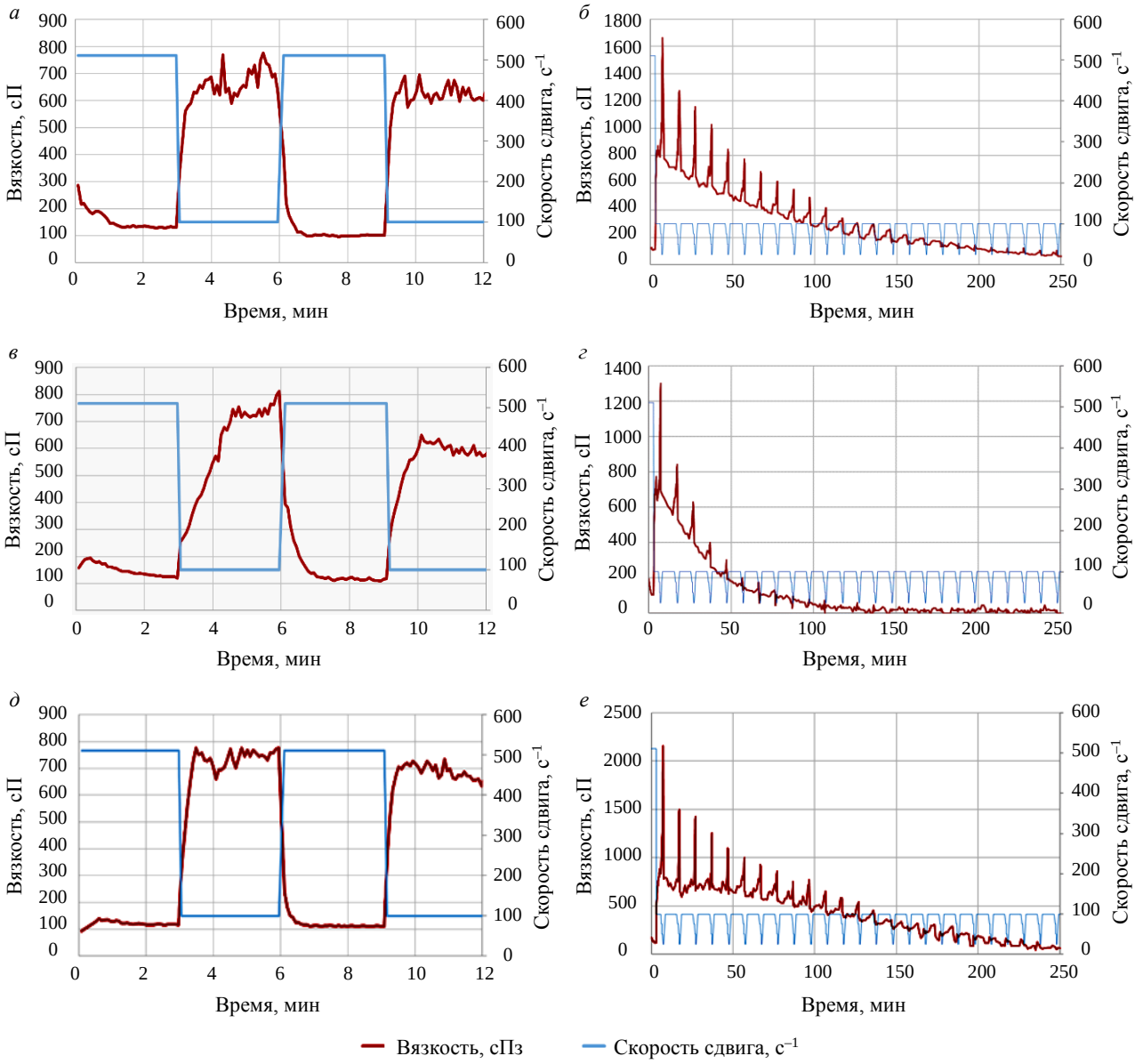



Рис.3. Реологические тесты жидкости разрыва на основе воды из источников № 1 (*а*, *б*); № 2 (*в*, *г*); № 3 (*д*, *е*); на чувствительность к сдвигу (*а*, *в*, *д*); на скорость деструкции (*б*, *г*, *е*)

Ожидаемо отмечена положительная корреляция pH с щелочностью, особенно сильная для источника № 3 ($r$ = 0,72). Это означает, что при высокой щелочности вода лучше буферирована и поддерживает чуть более высокий pH. В источнике № 2 такой зависимости не прослеживается, что может быть связано с влиянием других факторов.

Существенной взаимосвязи между pH и содержанием $Fe^{2+}$ не выявлено ($r$ < 0,15 по всем источникам). Это может быть связано с тем, что железо присутствует в слишком малых концентрациях.

Корреляционный анализ подтверждает, что для относительно чистой пресной воды (источники № 1 и 3) общая минерализация выступает главным фактором, совместно влияющим на жесткость, хлориды, сульфаты и частично щелочность. Напротив, у источника № 2 состав воды более смешанный: наблюдается наличие высоких относительно других источников концентраций солей различного происхождения, поэтому линейные зависимости между отдельными ионами не так очевидны.

*Влияние сезонного состава воды на свойства жидкостей ГРП.* Реологические исследования проводились в следующей последовательности:

• с помощью лабораторного блендера Waring приготавливался «линейный гель» (вода с гелеобразователем на гуаровой основе) путем гидратации в течение 20 мин;


Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• в «линейный гель» добавлялась линейка химических реагентов, которая включает в себя стандартные добавки для жидкостей разрыва: деэмульгатор, стабилизатор глин, деструктор, активатор деструктора;

• с помощью специальной добавки гель «сшивался», затем проводились тесты на реометре высокого давления Brookfield PVS.

Исследования включали в себя тесты на чувствительность к «сдвигу» (имитация движения жидкости по насосно-компрессорным трубам с последующим выходом в пласт-коллектор), а также на скорость деструкции с определением показателей поведения и консистенции. Необходимый диапазон динамической вязкости стандартной гуаро-боратной жидкости разрыва составляет ориентировочно 400-700 мПа·с.

По результатам реологических исследований установлено, что колебания в физико-химическом составе воды в течение года существенно отражаются на реологии сшитых гуаро-боратных жидкостей разрыва, используемых при ГРП (примеры на рис.3). По результатам тестов на чувствительность к сдвигу и скорость деструкции установлено следующее:

• Использование геля на воде с повышенной минерализацией из источника № 2 вызывает снижение первоначальной вязкости приготовленного геля. Скорее всего, высокая жесткость и содержание хлоридов препятствуют полноценной гидратации гуаровой основы и, возможно, может нарушаться действие сшивающего реагента. В итоге полученный сшитый гель имеет более низкую прочность между связями. По сравнению с мягкой водой (источники № 1 и 3), гели на жесткой воде обладают на 10-15 % меньшей максимальной вязкостью и, по-видимому, будут хуже удерживать пропант.

• Гели, приготовленные на относительно мягкой воде, показывают более длительное удержание вязкости. Минерализованная вода приводит к ускоренной деструкции геля. Таким образом, в более жесткой воде к моменту закачки в пласт вязкость геля ниже, что создает риски преждевременного осаждения пропанта.

Изменения в сезонном составе воды также влияют на работу окислительного деструктора. В высокоминерализованной воде источник № 2 содержал больше примесей, которые, предположительно, ускоряли распад перекисных соединений, в результате отмечены случаи ускоренного разрушения. Таким образом, одна и та же рецептура жидкости разрыва давала разное время деструкции в зависимости от свойств воды.

**Результаты работы**

Изменения параметров исследуемой воды (щелочности, жесткости, содержания хлоридов, железа и сульфатов) имеют сезонный характер. Проведенный мониторинг показал, что даже умеренные сезонные колебания параметров пресной воды (pH 7,3-7,9, щелочность 73-275 мг/л, жесткость 180-520 мг/л, $Cl^-$ 42-284 мг/л, $SO_4^{2-}$ 61-146 мг/л, $Fe^{2+}$ 0,1-0,3 мг/л) могут существенно изменять реологические свойства гуаро-боратных жидкостей ГРП. При значениях жесткости выше 300 мг/л, содержании хлоридов свыше 180 мг/л и сульфатов более 100 мг/л наблюдается снижение вязкости геля на 10-15 %, увеличение времени восстановления до рабочей вязкости и ускоренная деструкция, что не соответствует оптимальным требованиям к воде для ГРП (жесткость < 200-250 мг/л, $Cl^-$ < 150-180 мг/л, $Fe^{2+}$ < 0,1 мг/л).

Сравнение трех источников показало заметные различия в среднем составе. Источник № 2 имеет существенно более высокую минерализацию. При планировании работ ГРП необходимо учитывать, что использование воды разного происхождения может потребовать разных подходов. Менее минерализованные воды более благоприятны для приготовления жидкостей ГРП, тогда как более соленая вода может потребовать специальных мер подготовки или вовсе оказаться неподходящей для процесса ГРП.

Проведенный корреляционный анализ показал, что на уровень общей жесткости воды могут существенно влиять различные ионные компоненты. В водах с низкой минерализацией (источники № 1 и 3) установлены сильные положительные связи между общей жесткостью и содержанием хлоридов ($r$ = 0,90), сульфатов ($r$ = 0,78-0,87), щелочностью ($r$ = 0,53-0,62), что указывает на единый механизм изменения состава воды за счет разбавления или концентрации растворов. В то же время в более минерализованной воде (источник № 2) взаимосвязи между этими компонентами



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

ослаблены ($r$ = 0,17-0,51), это свидетельствует о сложной структуре солевого состава и влиянии дополнительных факторов. Эти данные подтверждают, что жесткость нельзя рассматривать как независимый параметр, она является результирующим показателем комплексных сезонных процессов, происходящих в водоемах.

Периоды повышенной минерализации воды в основном совпадают с ухудшением реологических характеристик сшитых гелей. Снижается их вязкость и ускоряется деструкция. Без адаптации рецептуры это может привести к непредсказуемому поведению жидкости ГРП, например, к преждевременному оседанию пропанта.

Для обеспечения стабильности операций ГРП необходимо проводить регулярный химический анализ воды и корректировать состав жидкости разрыва под сезонные условия. В наиболее жесткой воде может потребоваться увеличение загрузки гелеобразователя (для компенсации потери вязкости) или применение стабилизирующих добавок.

Результаты анализа подтверждают необходимость адаптивного подхода к разработке и подбору жидкостей ГРП. Вместо универсальной рецептуры следует иметь набор корректирующих мер для разного состава воды. Это обеспечивает поддержание оптимальной вязкости геля и контролируемой скорости его разрушения при любых сезонных отклонениях качества воды.

**Заключение**

Проведенное исследование подтвердило значительное влияние сезонных изменений физико-химического состава пресной воды на реологические характеристики жидкостей, применяемых в технологии гидроразрыва пласта. Установлено, что наиболее неблагоприятные условия для формирования стабильных сшитых гелей возникают в зимне-весенний период, когда минерализация воды достигает максимальных значений. Это приводит к снижению вязкости и ускоренной деструкции геля, повышая риски неэффективного размещения пропанта и ухудшения проводимости трещины.

Таким образом, для обеспечения высокой эффективности и надежности операций ГРП необходимо внедрение адаптивного подхода к подбору рецептур технологических жидкостей, включающего обязательный мониторинг водных источников и сезонную корректировку состава. Это позволит значительно повысить технологическую устойчивость процессов гидроразрыва, минимизировать затраты на неудачные закачки и обеспечить более стабильную добычу углеводородов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Zhiqiang Xie, Dongya Han, Jiangteng Li, Kaihui Li.* A State-of-the-Art Review of Hydraulic Fracturing in Geothermal Systems // Sustainability. 2024. Vol. 16. Iss. 24. № 11087. DOI: 10.3390/su162411087

2. *Hui Gao, Xiaohang Li, Teng Li et al.* Characteristics of Oil Production by Fracturing Fluid Additive-Assisted Displacement in Tight Oil Reservoirs // Energy & Fuels. 2024. Vol. 38. Iss. 18. P. 17541-17553. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02634

3. *Hao Yu, WenLong Xu, Bo Li et al.* Hydraulic Fracturing and Enhanced Recovery in Shale Reservoirs: Theoretical Analysis to Engineering Applications // Energy & Fuels. 2023. Vol. 37. Iss. 14. P. 9956-9997. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c01029

4. *Султанов Ш.Х., Мухаметшин В.Ш., Стабинскас А.П. и др.* Исследование возможности использования воды с высокой минерализацией для гидравлического разрыва пласта // Записки Горного института. 2024. Т. 270. С. 950-962.

5. *Fokker P.A., Borello E.S., Verga F., Viberti D.* Harmonic pulse testing for well performance monitoring // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 162. P. 446-459. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.053

6. *Khan H.J., Spielman-Sun E., Jew A.D. et al.* A Critical Review of the Physicochemical Impacts of Water Chemistry on Shale in Hydraulic Fracturing Systems // Environmental Science & Technology. 2021. Vol. 55. Iss. 3. P. 1377-1394. DOI: 10.1021/acs.est.0c04901

7. *Хузин Р.Р., Андреев В.Е., Мухаметшин В.В. и др.* Влияние гидравлического сжатия пласта на фильтрационно-емкостные свойства пластов-коллекторов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 688-697. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.8

8. *Альмухаметова Э.М., Гуторов А.Ю., Юмадилов Д.Б. и др.* Сокращение затрат на проведение гидравлического разрыва пласта // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 5. С. 103-112. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-5-103-112

9. *Jiarun Zhou, Shibin Wang, Ruoyu Yang et al.* A Study on a Novel Hydrophobic Associative Polymer Thickener for High-Salinity Water in Hydraulic Fracturing // ChemistrySelect. 2025. Vol. 10. Iss. 20. № e01613. DOI: 10.1002/slct.202501613

10. *Rodriguez A.Z., Huiyao Wang, Lei Hu et al.* Treatment of Produced Water in the Permian Basin for Hydraulic Fracturing: Comparison of Different Coagulation Processes and Innovative Filter Media // Water. 2020. Vol. 12. Iss. 3. № 770. DOI: 10.3390/w12030770

11. *Zang A., Hofmann H., Yinlin Ji et al.* How rock hydraulic fatigue methods from mining and petroleum industry assist in unlocking deep heat for a clean energy future // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2025. Vol. 217. № 115683. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115683

12. *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 (95). С. 56-61. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-2-56-61



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*

13. *Насыбуллин А.В., Садреева Р.Х., Бурлуцкий Е.А.* Определение эффективности стабилизатора глин в составе жидкости ГРП на образцах керна глинистых терригенных коллекторов на основе фильтрационных исследований // Нефтяная провинция. 2023. № 2 (34). С. 208-226. DOI: 10.25689/NP.2023.2.208-226

14. *Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Хамитов А.Д.* Особенности трансформации во времени состава пресных подземных вод в Республике Татарстан // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2023. Т. 165. № 3. С. 427-446. DOI: 10.26907/2542-064X.2023.3.427-446

15. *Рахимов И.И., Зайнуллин М.А., Игнашев Н.Е.* Природные и техногенные водоемы как резерваты по сохранению биологического разнообразия птиц в Республике Татарстан: постановка и анализ проблемы // Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки». 2023. № 2 (50). С. 21-36. DOI: 10.25688/2076-9091.2023.50.2.02

16. *Мусин Р.Х., Калкаманова З.Г.* Геохимия пресных подземных вод в областях нефтяного техногенеза (на примере Татарстана) // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2015. № 2 (12). 14 с. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2015-12.art12

17. *Мусин Р.Х., Галиева А.Р., Кудбанов Т.Г. и др.* О влиянии почв на формирование химического состава грунтовых вод в пределах Республики Татарстан // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2020. Т. 63. № 1. С. 90-99. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-1-90-99

18. *Корчева Е.С., Степанова С.В., Шайхиев И.Г.* Оценка качества воды реки Казанка // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 20. С. 186-189.

19. *Milke J., Gałczyńska M., Wróbel J.* The Importance of Biological and Ecological Properties of *Phragmites Australis* (Cav.) Trin. Ex Steud., in Phytoremendiation of Aquatic Ecosystems – The Review // Water. 2020. Vol. 12. Iss. 6. № 1770. DOI: 10.3390/w12061770

20. *Мингазова Н.М., Набеева Э.Г., Чебан Е.Ю. и др.* Оценка состояния Куйбышевского водохранилища в Республике Татарстан по данным экспедиции «Плавучий университет» // Проблемы экологии Волжского бассейна: Труды 8-й Всероссийской научной конференции, 21-22 ноября 2023, Нижний Новгород, Россия. Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2023. Вып. 6. 5 с.

21. *Leiming Li, Al-Muntasheri G.A., Feng Liang.* A review of crosslinked fracturing fluids prepared with produced water // Petroleum. 2016. Vol. 2. Iss. 4. P. 313-323. DOI: 10.1016/j.petlm.2016.10.001

22. *Das P., Konale S., Kothamasu R.* Effect of Salt Concentration on Base-gel Viscosity of Different Polymers used in Stimulation Fluid Systems // SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference and Exhibition, 25-27 February 2014, Vienna, Austria. OnePetro, 2014. № SPE-167786-MS. DOI: 10.2118/167786-MS

23. *Earnden L., Laredo T., Marangoni A.G. et al.* Modulation of the Viscosity of Guar-Based Fracking Fluids Using Salts // Energy & Fuels. 2021. Vol. 35. Iss. 19. P. 16007-16019. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.1c02835

24. *Сальникова Ю.И.* Результаты исследований совместимости пластовых и закачиваемых вод на месторождениях углеводородов в Западной Сибири // Успехи современного естествознания. 2024. № 2. С. 44-53. DOI: 10.17513/use.38217

25. *Швыдкий В.О., Дубовик А.С., Козлов М.В. и др.* Влияние физико-химических свойств и состава воды реки Дубны на состояние процессов перекисного окисления липидов в биологических системах // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 4. С. 498-505. DOI: 10.31857/S0321059624040101

26. *Кильянов М.Ю., Игревский Л.В., Хафизов С.Ф. и др.* Повышение эффективности применения бактерицидов и биостатов при использовании морской воды в системе поддержания пластового давления // Вестник нефтегазовой отрасли Казахстана. 2023. Т. 5. № 3. С. 59-70. DOI: 10.54859/kjogi108636

27. *Pereira G.F., Rosin T.R., Braga B. et al.* Evaluation of biofilm inhibition and detachment by commercial biocides in sulfate-reducing bacteria consortia from oil fields // Journal of Water Process Engineering. 2024. Vol. 63. № 105547. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105547

28. *Булдакова Н.С., Новикова Н.В., Фахриева Г.В. и др.* Формирование подходов к подбору бактерицидов для подавления жизнедеятельности сульфатвосстанавливающих бактерий // Нефтепромысловое дело. 2020. № 6 (618). С. 68-72. DOI: 10.30713/0207-2351-2020-6(618)-68-72

29. *Мамедов К.А., Гамидова Н.С.* Применение бактерицид-ингибитора комплексного действия для защиты от коррозии нефтепромыслового оборудования и трубопроводов // Территория «Нефтегаз». 2018. № 3. С. 20-25.

30. *Arroyo J.I., Díez B., Kempes C.P. et al.* A general theory for temperature dependence in biology // PNAS. 2022. Vol. 119. № 30. № e2119872119. DOI: 10.1073/pnas.2119872119

31. *Мушаева Т.И., Демидов В.В.* Закономерности формирования поверхностного стока и смыва почвы в период весеннего снеготаяния на территории агроландшафта и их влияние на качество речных вод // Живые и биокосные системы. 2015. № 11. 9 с.

32. *Okwonu F.Z., Chiyeaka O.M., Ahad N.A., Sharipov O.* Robust Pearson correlation coefficient for imbalanced sample size and high dimensional data set // Science World Journal. 2025. Vol. 20. № 1. P. 131-136. DOI: 10.4314/swj.v20i1.17

***Авторы*: Илья Алексеевич Аленькин**, *младший научный сотрудник* (*Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *i.alenkin@agni-rt.ru*, *https://orcid.org/0009-0002-4609-1377*, **Арслан Валерьевич Насыбуллин**, *д-р техн. наук, заведующий кафедрой* (*Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-1943-5082*, **Александр Викторович Кочетков**, *канд. техн. наук, ведущий эксперт по новым реагентам* (*ПАО «Татнефть» им. В.Д.Шашина, Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-4194-3251*, **Ринат Рашитович Закиров**, *инженер* (*Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6427-4930*, **Тимур Ленарович Гайфуллин**, *аспирант* (*Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *https://orcid.org/0009-0006-5698-9542*, **Рамис Расилевич Сахибгараев**, *главный специалист по проектированию* (*ПАО «Татнефть» им. В.Д.Шашина, Альметьевск, Республика Татарстан, Россия*), *https://orcid.org/0009-0000-3130-8268*.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*



*Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0*