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

Анализ влияния вязкоупругих свойств синтетической жидкости гидроразрыва пласта на пескоудерживающую способность

Д.В.Имангулов✉, А.И.Пономарев, Д.В.Кашапов
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Имангулов Д.В., Пономарев А.И., Кашапов Д.В. Анализ влияния вязкоупругих свойств синтетической жидкости гидроразрыва пласта на пескоудерживающую способность // Записки Горного института. 2026. Т. 279. С. 70-81. EDN NIULGR

Аннотация
Одна из актуальных научных проблем в области интенсификации добычи углеводородов из залежей с трудноизвлекаемыми запасами методом гидравлического разрыва пласта – недостаточная изученность влияния упругих свойств жидкости гидроразрыва пласта (ГРП) на эффективность удержания пропанта при инициировании трещин в призабойной зоне скважины. Ранние отечественные и зарубежные исследования пескоудерживающих свойств утверждают, что ключевую роль в удержании пропанта играет вязкость жидкости, однако последние данные показывают значительное влияние упругих свойств полимерных систем, особенно при применении низковязких синтетических жидкостей ГРП на основе полиакриламида (ПАА). Цель настоящего исследования заключается в фундаментальном обосновании влияния вязкоупругих свойств жидкостей ГРП на эффективность удержания пропанта. Статья содержит методологию и результаты лабораторных исследований по оценке вязкоупругих и пескоудерживающих свойств жидкостей ГРП на основе ПАА и гуарового полимера. Исследования показывают, что жидкости ГРП на основе ПАА с низкой эффективной вязкостью системы обладают более выраженными упругими свойствами в сравнении с линейными гуаровыми гелями: время релаксации и первая разность нормальных напряжений для синтетической жидкости ГРП, соответственно, в 1,99 и 4 раза превышают аналогичные показатели для линейного геля. Результаты исследований подтвердили, что скорость оседания пропанта в жидкости ГРП на основе ПАА в статических условиях оказалась в 28 раз ниже, чем в линейном гуаровом геле при эквивалентной концентрации активного вещества. Упругие свойства жидкости ГРП оказывают весомое влияние на пескоудерживающую способность, что обосновывает перспективность применения низковязких синтетических жидкостей ГРП на основе ПАА для интенсификации добычи углеводородов из коллекторов с проницаемостью ниже 1 мД.

Ключевые слова
реология; вязкоупругие свойства; жидкость ГРП; полиакриламид; пескоудерживающая способность; время релаксации; первая разность нормальных напряжений

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 06.05.2025 ***Принята: 04.03.2026*** ***Онлайн: 18.05.2026*** ***Опубликована: 20.07.2026***

Введение

Гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из наиболее применяемых методов увеличения нефтеотдачи и интенсификации добычи нефти, концепция которого заключается в закачке в целевой пласт технологической жидкости (жидкости ГРП) под давлением, превышающим предел механической прочности горных пород. В результате в призабойной зоне пласта (ПЗП) инициируется трещина, для закрепления которой перед снятием давления и освоением скважины применяют расклинивающий агент (РА) – керамический пропант или кварцевый песок [1]. Для того, чтобы плановый объем РА заполнил внутреннее пространство трещины и сохранил проницаемость, жидкость ГРП должна обладать определенными технологическими свойствами, зависящими от ее реологии [2].

Разработанные инновационные синтетические жидкости ГРП на основе полиакриламида (ПАА) в отличие от стандартных сшитых гуарово-боратных жидкостей обладают выраженной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

упругостью при значительно меньшей вязкости системы (рис.1) [3]. Применение данных жидкостей позволяет вводить в разработку трудноизвлекаемые запасы залежей углеводородов, характеризующихся проницаемостью коллектора ниже 1 мД [4].

В ранних исследованиях [5, 6] физико-химических свойств жидкостей ГРП утверждается, что вязкость жидкости играет ключевую роль в процессах удерживания и переноса РА, однако исследования последних лет [7, 8] говорят о значительном влиянии упругих свойств на способность жидкости переносить РА.

Так, в работе [9] представлено исследование влияния упругих свойств жидкостей ГРП на основе анионного ПАА, приготовленного на дистиллированной воде, на скорость оседания пропанта, представленного в виде одиночных кварцевых частиц. Исследование проводилось в статических условиях при температуре 25 °С. Свежеприготовленные образцы жидкостей ГРП на основе ПАА с концентрациями 3, 5 и 9 л/м^3 поочередно вносились в прозрачный сосуд с нанесенной градуированной шкалой, после чего в образцы добавлялись кварцевые частицы диаметром 2 мм. В ходе исследования фиксировались время и, как следствие, скорость оседания частиц. Результаты показали, что в жидкости ГРП на основе ПАА с концентрацией 3 л/м^3, обладающей наименьшими упругими свойствами (время релаксации 12 с), скорость оседания частиц составила 3,0 мм/с, для образца с концентрацией 5 л/м^3 (время релаксации 50 с) – 1,5 мм/с, для образца с наибольшей концентрацией 9 л/м^3 (время релаксации 110 с) – 0,8 мм/с. Таким образом было определено, что увеличение упругих свойств жидкости ГРП позволяет улучшить ее пескоудерживающую способность.

В работе [10] сравнивалась скорость оседания керамического пропанта в жидкости ГРП на основе ПАА и линейного геля, не обладающего упругими свойствами. Загрузки линейного геля и ПАА взяты из расчета равенства концентраций активного вещества: ПАА – 6 л/м^3, линейный гель – 3 кг/м^3. Образцы приготовлены на минерализованной воде пласта Bakken при температуре 21 °С. Фракция пропанта составила 20/25 и 60/70. Результаты по определению скорости оседания частиц пропанта в статических условиях показали, что жидкость ГРП на основе ПАА лучше удерживает как пропант с малой фракцией (60/70: ПАА – 0,025 мм/с, линейный гель – 0,064 мм/с), так и с большой фракцией (20/25: ПАА – 0,339 мм/с, линейный гель – 4,899 мм/с). Стоит отметить, что увеличение скорости оседания в линейном геле при переходе к пропанту с большей фракцией значительно выше в сравнении с жидкостью ГРП на основе ПАА.

Аналогичные исследования проводились в работе [11] для навески кварцевого песка с фракцией 40 и 70 меш и концентрацией 60 кг/м^3. Для эксперимента взяты жидкость ГРП на основе анионного ПАА с загрузкой 4 л/м^3 и линейный гель с загрузкой 3 кг/м^3, приготовленные на дистиллированной воде при температуре 25 °С. Скорость оседания в линейном геле, в котором отсутствуют упругие свойства, составила 0,08 и 4,2 мм/с для фракций 40 и 70 меш, для жидкости ГРП на основе ПАА – 0,05 и 0,17 мм/с соответственно.

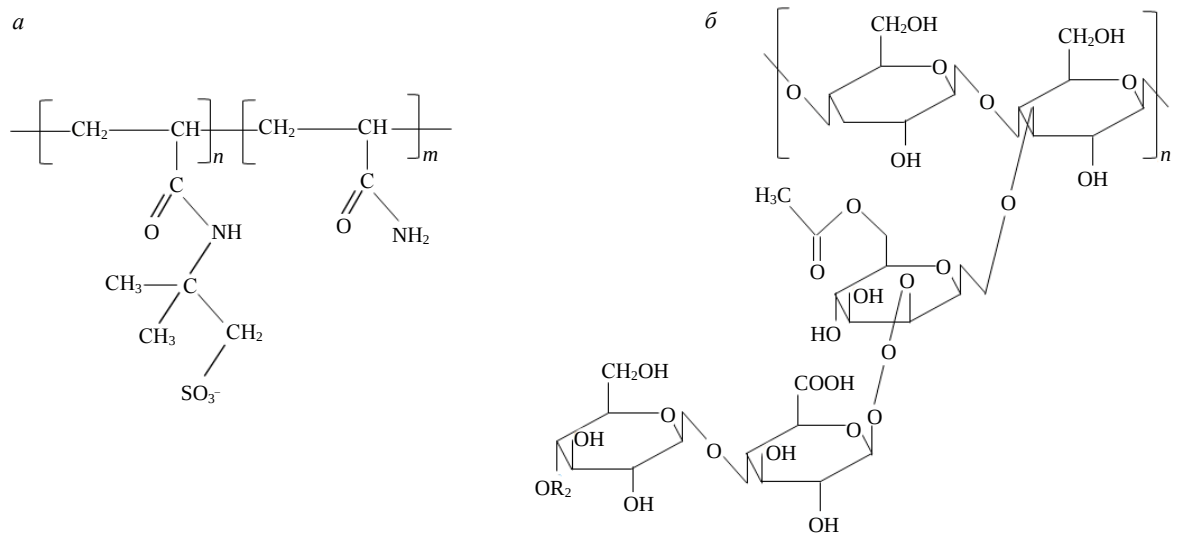


Рис.1. Принципиальная химическая формула гидролизованного ПАА (*а*) и гуаровой камеди (*б*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, проведенные исследования показали важность влияния упругих свойств на пескоудерживающую способность жидкости ГРП, а также перспективность применения ПАА в качестве гелеобразующего агента. Однако не был проведен фундаментальный анализ механизма влияния упругих свойств на способность жидкости удерживать и переносить пропант.

Целью настоящего исследования является фундаментальное обоснование влияния вязкоупругих свойств на эффективность переноса РА с использованием метода воздействия на образец осцилляционными колебаниями с периодической фиксацией их амплитуды и частоты. В работе содержится анализ научно-технической отечественной и зарубежной литературы в области исследования и применения вязкоупругих жидкостей на основе ПАА, а также методология и результаты проведенных лабораторных исследований на примере образца синтетического полимера и линейного гуарового геля.

Методы

Вязкоупругие жидкости относятся к неньютоновским системам, сочетая в себе свойства жидких и твердых (упругих) тел. При низких скоростях сдвига внутренняя структура вязкоупругих жидкостей представляет собой совокупность молекул с многомерной цепью, свернутых в беспорядочный клубок, характеризующий оптимальное распределение энергии внутри цепи [12, 13]. Увеличение скорости сдвига ведет к конформации молекул полимера, их вытягиванию и перераспределению внутри объема жидкости [14].

Деформация молекулярной структуры полимерной цепи описывается законом Гука:

$$\gamma(t) = \gamma_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

где $\gamma(t)$ – изменение деформации тела во времени, м$^{-1}$; γ_0 – амплитуда изменения деформации тела, м$^{-1}$; ω – угловая скорость, с$^{-1}$; t – время, с.

Напряжение сдвига также подчиняется синусоидальному закону с дополнительным смещением на фазовый угол:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t - \delta), \quad (2)$$

где $\sigma(t)$ – изменение напряжения сдвига во времени, Па; σ_0 – амплитуда изменения напряжения сдвига, Па; δ – фазовый угол, рад.

Выражения (1) и (2) характеризуют инертность процесса деформации тела за счет действия сил упругости: при приложении сдвиговой нагрузки полная деформация молекул наступает через переходный процесс, характеризующийся смещением напряжения сдвига относительно деформации тела на фазовый угол δ [15]. В зависимости от величины фазового угла δ поведение тела можно описать двумя предельными значениями:

• $\delta = 0$, напряжение сдвига в теле совпадает по фазе с наложением нагрузки; данный случай характеризует идеально упругое тело, в котором вся запасенная энергия без потерь на вязкое течение тратится на деформацию молекул полимера;

• $\delta = \pi/2$, напряжение сдвига в образце находится в противофазе с наложением нагрузки; данный случай характеризует идеально вязкое тело, в котором вся энергия рассеивается на вязкое течение.

Проанализировав механизм поведения идеально вязкого и упругого тела, можно заключить, что вязкоупругая жидкость является переходной формой тела, обладающей способностью восстанавливать часть внутренней структуры за счет энергии, запасенной за счет упругих деформаций молекул полимера, в то время как остальная энергия рассеивается на вязкое течение [16].

В работах [17-19] был предложен метод описания вязкой и упругой составляющей при помощи специальных динамических модулей: модуль накоплений G', характеризующий восстановление структуры после снятия сдвигового напряжения за счет запасенной энергии в виде упругой деформации молекул полимера; модуль потерь G'', характеризующий потери энергии на вязкое течение под действием сдвиговой нагрузки.

На основании данных утверждений и закона Гука, модуль накоплений G' можно представить, как функцию косинуса фазового угла δ с аргументом, равным отношению амплитуды напряжения к амплитуде деформации тела. Модуль потерь G'' описывается функцией синуса фазового угла δ,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

находящегося с модулем накоплений G' в противофазе, с аналогичным аргументом. Таким образом, модули накопления можно представить как

$$\begin{cases} G' = \dfrac{\sigma_0}{\gamma_0}\cos\delta, \\ G'' = \dfrac{\sigma_0}{\gamma_0}\sin\delta. \end{cases} \tag{3}$$

Очевидно, что сумма энергий, запасенная за счет упругой деформации молекул полимера и рассеянная при вязком течении, характеризует общее реологическое поведение вязкоупругих жидкостей [20]. Перейдя в полярную систему координат и представив модуль накоплений и потерь как действительную и мнимую часть комплексного числа, можно получить параметр комплексного модуля сдвига вязкоупругой жидкости:

$$G^* = \frac{\sigma_t}{\gamma_t} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}\left(\cos\delta + i\sin\delta\right) = G' + iG''. \tag{4}$$

В свою очередь, комплексный модуль сдвига связан с комплексной вязкостью посредством формулы

$$\mu^* = G^*/\omega, \tag{5}$$

где μ^* – комплексная вязкость вязкоупругой жидкости, Па·с.

Из выражения (5) видно, что увеличение вязкоупругих свойств жидкости приводит к повышению комплексной вязкости системы. Однако актуальным остается вопрос корректной количественной оценки вклада вязкой и упругой составляющей на реологию жидкостей ГРП [21, 22]. Используемые для оценки эффективной вязкости реометры, работающие при атмосферном давлении, не способны определить вязкоупругие свойства жидкости. Для этого необходимо за малый промежуток времени создать многочисленное изменение амплитуды или частоты сдвигового напряжения с целью вычисления смещения кривой отклика относительно заданной скорости сдвига, что невозможно осуществить в атмосферных реометрах [23, 24].

Для оценки вклада упругих и вязких свойств в жидкостях ГРП применяют реометры с функцией осцилляции, такие как HR-3 (Discovery), Rheotest RN 5.3 или Anton Paar, в которых заложена методика воздействия на образец контролируемыми колебаниями заданной частоты и амплитуды [25]. Данная методика позволяет оценить вязкоупругие характеристики материала в оптимальном режиме с сохранением структурной целостности образца при определении его динамических свойств, а также выявить особенности его поведения, которые не проявляются в тестах с постоянной скоростью сдвига [26].

Для определения модулей накоплений G' и потерь G'' в осцилляционном реометре задаются гармонические колебания деформации. Упругий модуль накоплений G' характеризует накопленную энергию деформации в системе и отражает характеристики образца как твердого тела, в то время как величина вязкого модуля потерь G'' определяет рассеивание энергии, придавая образцу свойства жидкого тела. Таким образом, отклонение в интервале $0 \le t \le \delta$ количественно определяет величину модуля накоплений G', а отклонение в интервале $\delta \le t \le \pi/2$ – величину модуля потерь G'' [27].

Осцилляционный тест проводится в двух режимах: с изменением амплитуды колебаний при фиксированной частоте (амплитудная развертка) и при изменении частоты колебаний при фиксированной амплитуде (частотная развертка) [28].

Исследования с амплитудной разверткой позволяют оценить область обратимых упругих деформаций (LVE-диапазон), т.е. такой диапазон величин деформаций, при котором исследуемый образец сохраняет структурную устойчивость по мере увеличения воздействия нагрузок (рис.2, *а*). На рис.2, *б* LVE-диапазон характеризуется параллельностью кривых G' и G'' относительно оси деформаций Y. В момент, когда динамические модули G' и G'' отклоняются от параллельных значений, в системе начинает возникать необратимое разрушение полимерной структуры, в ходе

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

которого энергия упругих деформаций начинает тратиться на вязкое трение, что демонстрирует постепенное сближение кривых G' и G''. Точка пересечения линий динамических модулей G' и G'' количественно равна статическому напряжению сдвига, при превышении которого образец безвозвратно теряет упругие свойства. Исходя из этого, можно сделать вывод о поведении жидкости в зависимости от значения модуля накоплений G' и модуля потерь G'': при $G' > G''$ образец соответствует вязкоупругой жидкости, при $G' < G''$ – вязкой жидкости.

Исследование образца в режиме частотной развертки применяется для оценки вязкоупругих свойств жидкостей в условиях с нестационарной сдвиговой нагрузкой (рис.2, *в*). Зависимости модулей G' и G'' имеют логарифмический вид, в точке пересечения которых величина накопленной за счет упругих деформаций и потраченной энергии совпадают. Обратная величина от угловой частоты ω, при которой произошло пересечение модулей G' и G'', называется временем релаксации λ. Увеличение времени релаксации жидкости λ указывает на большее количество накопленной энергии за счет упругой деформации звеньев цепи и, как следствие, более выраженные упругие свойства. Соответственно, чем меньше частота деформаций, при которой произошло пересечение динамических модулей G' и G'', тем более выраженными упругими свойствами обладает образец (рис.2, *г*).

Помимо модулей накоплений и потерь, посредством функционала осцилляционных реометров можно определить первую разность нормальных напряжений N_1. Физический смысл первой разности нормальных напряжений заключается в формировании нормальных компонент в тензоре напряжений жидкостей с упругими полимерными цепями. При сдвиговом течении чисто вязких жидкостей в среде действуют только касательные напряжения, поскольку сила связей между молекулами в объеме жидкости пренебрежимо мала. При добавлении в жидкость полимерных молекул инициируются связи между образованными клубками молекул, причем с повышением концентрации полимера взаимодействие молекул повышается до их проникновения друг в друга [29].

Поведение вязкоупругих жидкостей описывается эффектом Вайсенберга, согласно которому при вращении стержня при заданной угловой скорости жидкость не отбрасывается к стенкам сосуда за счет центростремительного ускорения, образовывая воронку вокруг стержня, а, наоборот, адгезируется на его поверхности за счет взаимного зацепления молекул. Сила зацепления молекул полимера характеризуется упругой силой их связей, стремящейся вернуть форму молекулы в исходное состояние. В результате этого происходит захват окружающих молекул адгезированными

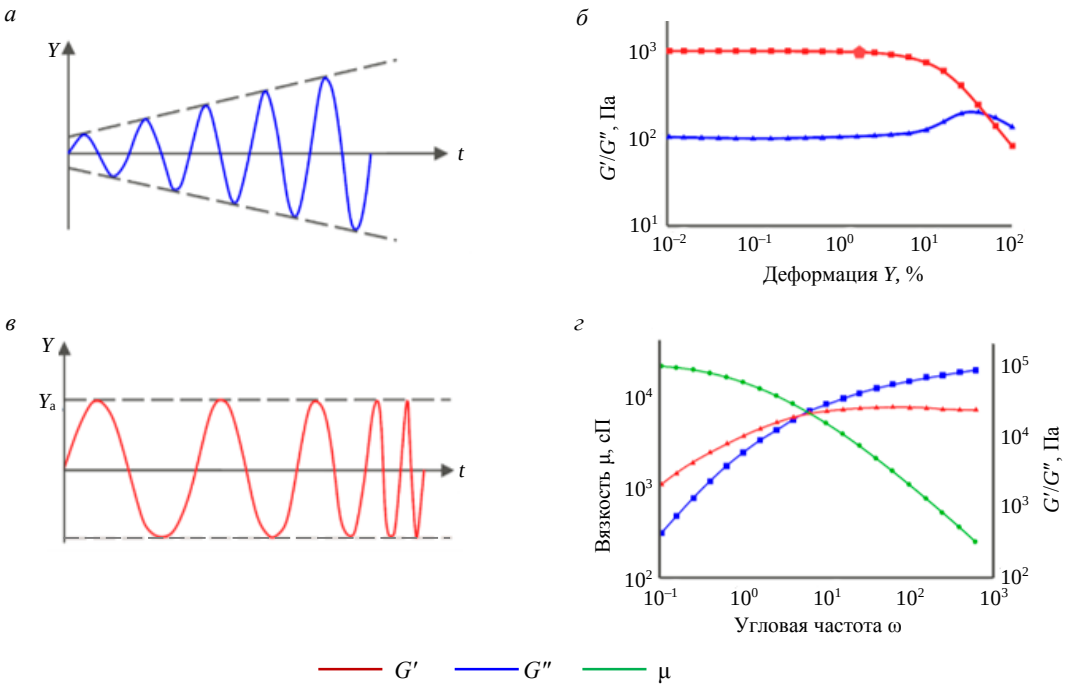


Рис.2. Типовые результаты проведения осцилляционного теста в амплитудной (*а*, *б*) и частотной (*в*, *г*) развертках

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

на поверхности стержня деформированными молекулами. Из этого следует, что чем выше упругость молекулярных связей образца, тем более выраженным становится эффект Вайсенберга [30]. Данный механизм можно описать аналитически, разложив напряженное состояние молекул, подвергнутых конформации, на касательную и ортогональную составляющую девиатора напряжений (рис.3). Пусть к элементу образца приложено касательное напряжение деформации σ_{11}, направленное вдоль оси *OX*. Тогда деформированные молекулы стремятся вернуть свое исходное состояние, что вызывает появление нормальных составляющих деформации σ_{22} и σ_{33}, направленных вдоль осей *OZ* и *OY* соответственно. Разность нормальных и касательной составляющих напряжений внутри полимерных цепочек численно равна первой и второй разности нормальных напряжений:

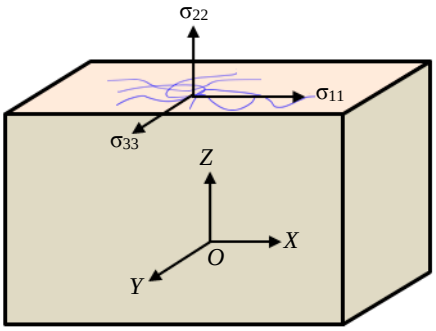


Рис.3. Инициирование напряжений в элементе вязкоупругого тела при сдвиге

$$\begin{cases} N_1 = \sigma_{22} - \sigma_{11}, \\ N_2 = \sigma_{33} - \sigma_{11}. \end{cases}$$

Проведенные исследования показали, что существенный вклад в упругое поведение жидкостей ГРП оказывает первая разность нормальных напряжений N_1, в то время как вторая разность нормальных напряжений N_2 пренебрежимо мала ввиду малых значений составляющих σ_{33}.

Аналитически определить фундаментальную связь между вязкоупругими свойствами и эффективностью переноса пропанта предложено путем разложения классической формулы Стокса. Классическая формула Стокса, описывающая скорость оседания твердой частицы в жидкости, показывает, что пескоудерживающая способность зависит от эффективной вязкости μ и плотности системы $\rho_ж$, а также плотности $\rho_ч$ и диаметра *d* взвешенных частиц:

$$v_0 = \frac{2(\rho_ч - \rho_ж)d^2 g}{18\mu},$$

где $\rho_ч$ – плотность частицы, кг/м^3; $\rho_ж$ – плотность жидкости, кг/м^3.

Очевидно, что повышение вязкости жидкости приводит к улучшению пескоудерживающей способности жидкости за счет повышения силы лобового сопротивления, действующей на частицу со стороны жидкости:

$$F_{st} = 3\pi\mu U d,$$

где *U* – модуль скорости частицы относительно жидкости, м/с.

Силу лобового сопротивления частицы можно представить в виде интеграла по поверхности Ω к этой частице:

$$F_{st} = \int nT' dS,$$

где *n* – вектор нормали к поверхности; T' – тензор напряжений в жидкости, Па; *S* – площадь поверхности частицы, м^2.

Тензор напряжений в жидкости можно разложить на тензор вязких напряжений K' и произведение абсолютного давления *P* на единичную матрицу I':

$$T' = -PI' + K'.$$

При дальнейшем разложении тензора вязких напряжений K' можно выявить, что его величина зависит как от эффективной вязкости системы, так и от тензора скоростей деформации:

$$\begin{cases} K' = 2\mu S' - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I', \\ S' = \frac{1}{2}\left(\nabla u + (\nabla u)^T\right), \end{cases}$$

где *u* – поле скоростей; S' – тензор скоростей деформации, с$^{-1}$.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, было определено, что упругие свойства жидкости, которые характеризуют энергию, запасенную за счет упругих деформаций, являются одной из составляющих общего тензора напряжений в составе тензора вязких напряжений и не зависят от эффективной вязкости жидкости. Данное обстоятельство обуславливает влияние упругих свойств на скорость оседания частицы в жидкости ГРП и их значимость при применении низковязких жидкостей. При заданной скорости течения для высоковязкой жидкости в щели характеризуется ламинарный режим, для низковязкой жидкости – турбулентный режим. Турбулизация потока жидкости положительно влияет на процесс переноса пропанта в трещине [31]. В связи с этим применение низковязких жидкостей ГРП является наиболее перспективным подходом к повышению рентабельности добычи углеводородов из залежей с трудноизвлекаемыми запасами.

Обсуждение результатов

Лабораторные исследования по оценке вязкоупругих свойств проводились на образце жидкости ГРП на основе анионного ПАА в форме суспензии с использованием осцилляционного реометра Anton Paar MCR 702 TwinDrive в режиме частотной развертки. Основным искомым параметром принято время релаксации λ. Диапазон частоты колебаний составил 0,2-30 Гц, температура исследования 25 °С. С целью выявления преимуществ использования низковязких синтетических жидкостей ГРП проведен аналогичный набор исследований на образце линейного гуарового геля при равных термобарических условиях. Загрузка полимера для линейного геля равна 2 кг/м^3 в соответствии с практикой применения высокорасходных ГРП на низкопроницаемых терригенных коллекторах Западной Сибири (см. таблицу). Соответственно, из расчета равенства концентраций активного вещества в испытуемых растворах для жидкости ГРП на основе ПАА, выпущенной в форме суспензии, загрузка полимера составила 4 л/м^3.

Геолого-физические параметры низкопроницаемых коллекторов Западной Сибири (в среднем по всем объектам)

Группа объектов	Проницаемость, мД	Пористость, д.ед.	Эффективная нефтенасыщенная толщина, м	Коэффициент песчанистости, д.ед.
АС	1,68	0,17	12,7	0,43
Ач	1,56	0,16	15,2	0,30
ЮС	1,48	0,14	9,6	0,21

Каждый из образцов помещался в рабочую камеру реометра, после чего выставлялась температура 25 °С и амплитуда колебаний 40 %, которые поддерживались постоянными на всем протяжении исследования. В соответствии с руководством по эксплуатации оборудования после выставления режима тестирования и запуска реометра в работу на образцы полимера воздействовала волновая сдвиговая нагрузка, начиная с максимального значения. Чувствительные элементы реометра фиксировали изменение деформации полимеров, в результате чего выводилось значение модулей накоплений G' и потерь G'' в заданный момент времени. В общей сложности была произведена запись 13 измерений по каждому из образцов на всем диапазоне частоты колебаний, на основе которых построены соответствующие графики (рис.4).

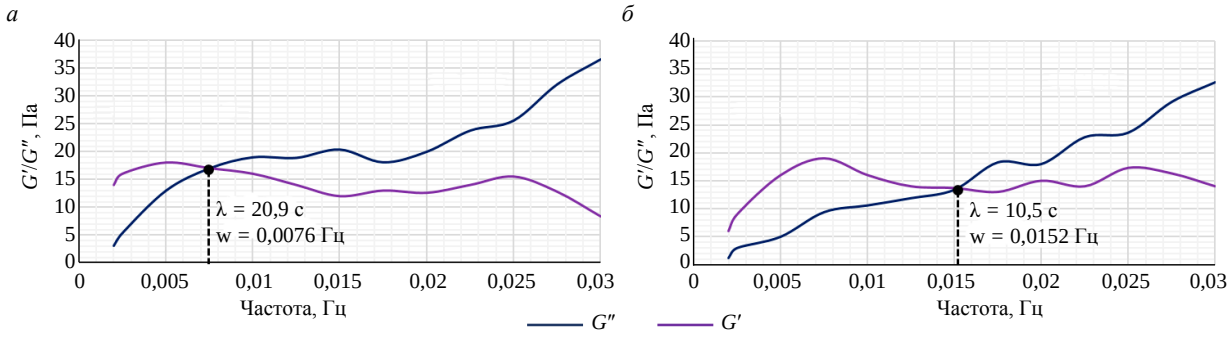


Рис.4. Результаты измерения модуля накоплений G' и модуля потерь G'' для жидкости ГРП на основе ПАА (*а*) и линейного гуарового геля (*б*) в режиме частотной развертки (T = 25 °С)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На основании полученных результатов было определено, что пересечение кривых G' и G'' произошло при частоте колебаний 0,0076 Гц для жидкости ГРП на основе ПАА и при 0,0152 Гц для линейного геля. Поскольку параметр времени релаксации λ обратно пропорционален удвоенному произведению частоты осциллирующих колебаний и числа π, время релаксации λ для жидкости ГРП на основе ПАА составило 20,9 с, в то время как для линейного геля оно составило 10,5 с. Таким образом, время релаксации λ синтетической жидкости на основе ПАА оказалось в 1,99 раза больше, чем для линейного гуарового геля.

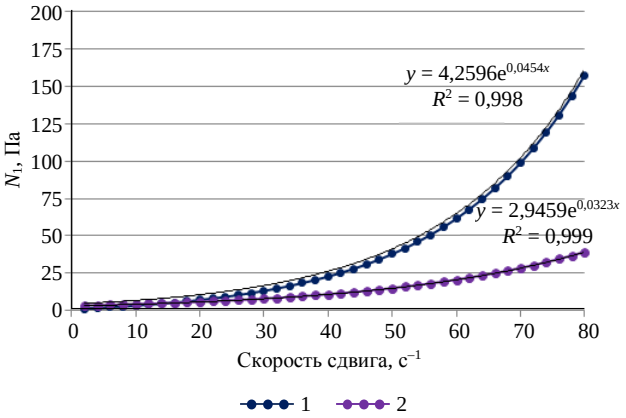


Рис.5. Результаты измерения первой разности нормальных напряжений N_1 для жидкости ГРП на основе ПАА (1) и линейного гуарового геля (2)

Оценка первой разности нормальных напряжений N_1 аналогичным образом производилась на осцилляционном реометре Anton Paar MCR 702 TwinDrive в режиме установившегося течения при поступательном увеличении скорости сдвига с 1 до 80 $с^{-1}$. В общей сложности было произведено 40 измерений по каждому из образцов жидкостей ГРП с дальнейшим построением графиков (рис.5).

На основании полученных результатов можно отметить:

• первая разность нормальных напряжений N_1 при увеличении скорости сдвига возрастает по экспоненциальному закону для обоих образцов;

• для синтетической жидкости ГРП первая разность нормальных напряжений N_1 более чем в четыре раза выше, чем для линейного геля – 157,4 Па и 39,2 Па при скорости сдвига 80 $с^{-1}$ соответственно.

Наибольшее расхождение в значениях N_1 наблюдается при больших скоростях сдвига, из чего следует, что упругие свойства обладают наиболее выраженным влиянием на поведение жидкости ГРП при больших сдвиговых нагрузках [32]. В пластовых условиях при формировании трещины ГРП данная особенность вязкоупругих синтетических жидкостей ГРП позволяет дольше сохранять РА во взвешенном состоянии, предотвращая его преждевременное оседание вблизи стенки скважины [33-35]. Очевидно, для целей ГРП необходимо увеличение вязкоупругих свойств технологической жидкости, так как это позволяет использовать низковязкие системы в виде понизителя трения для повышения объема стимулированной зоны пласта.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований по оценке вязкоупругих свойств было доказано, что жидкость ГРП на основе ПАА в сопоставимой концентрации активного вещества обладает более выраженными упругими свойствами, характеризующимися временем релаксации λ, и первой разностью нормальных напряжений N_1, чем линейный гуаровый гель.

Для установления связи между вязкоупругими свойствами и пескоудерживающей способностью жидкости ГРП также были проведены лабораторные исследования по оценке скорости оседания РА.

Упругие деформации более плотных молекулярных цепей ПАА способны накапливать в себе большую часть энергии, затрачиваемой жидкостью при закачке, чем гуаровые гели. Запасенная таким образом энергия сохраняет внутреннюю пространственную структуру жидкости, что положительно влияет на транспортировку и удерживание РА во взвешенном состоянии. Иными словами, более долгая деформация молекул, когда время релаксации λ сопоставимо с временем перемещения частицы РА на расстояние *dz*, позволяет создать сопротивление движению частицы РА, за счет которой при низкой вязкости жидкости ГРП происходит более долгое осаждение РА. Низкая вязкость синтетических систем позволяет снижать давление внутри трещины, повышая рост трещины ГРП в длину и ограничивая ее рост в высоту, а также уменьшать операционные затраты на отработку жидкости из скважины после ГРП.

Перед проведением лабораторного исследования по оценке пескоудерживающей способности была произведена оценка эффективной вязкости жидкости на основе ПАА и линейного геля

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0



Рис.6. Атмосферный ротационный вискозиметр Fann 35

на ротационном вискозиметре Fann 35 (рис.6). При скорости сдвига 100 $с^{-1}$ эффективная вязкость жидкости ГРП на основе ПАА составила 14 сП для концентрации 2 л/$м^3$ и 36 сП для концентрации 4 л/$м^3$. Эффективная вязкость для линейного гуарового геля при скорости сдвига 100 $с^{-1}$ составила, соответственно, 36 и 78 сП.

Полученные результаты показали, что эффективная вязкость жидкости ГРП на основе ПАА ниже в 2,2-2,6 раза по сравнению с линейным гелем с сопоставимой концентрацией полимера. Ввиду того, что средняя молекулярная масса полиакриловой кислоты (производной для всех типов ПАА) составляет 72,06 г/моль, а молекулярная масса гуаровых гелей за счет сложной полимерной структуры с длинными β-гликозидными связями достигает значений 180,16 г/моль и выше, полученные результаты доказывают непосредственное влияние химического строения и размера молекулы полимера на общую вязкость системы. Можно сделать вывод, что из-за существенно меньшего размера молекул ПАА плотность полимерных связей синтетических жидкостей значительно больше, чем у гуаровых гелей без добавления сшивателя. Данное утверждение обосновывает природу более выраженных упругих свойств синтетических жидкостей ГРП на основе ПАА в сравнении с линейными гелями.

Далее были проведены лабораторные исследования скорости оседания пропанта в статических условиях для образцов жидкости ГРП на основе ПАА и линейного геля, приготовленных в дистиллированной воде при температуре 25 °С в двух концентрациях полимера: 2 и 4 л/$м^3$ для синтетического полимера и 1,8 и 4,2 кг/$м^3$ для линейного геля. В качестве РА выбран керамический пропант марки ForeProp фракции 16/20 с концентрацией 700 кг/$м^3$.

Для проведения исследования использовались градуированные сосуды, в которые помещалось 100 мл свежеприготовленного полимера с добавлением пропанта с концентрацией 700 кг/$м^3$. Непосредственно после помещения смеси в сосуд запускался секундомер. Через 5, 30 и 120 мин для каждого исследуемого образца визуально оценивалась часть от общего объема РА, осевшего на дно градуированного сосуда. Определение пескоудерживающей способности жидкостей ГРП показало следующие результаты:

• время оседания пропанта в жидкости ГРП на основе ПАА с концентрацией полимера 2 и 4 л/$м^3$ составило 120 и 960 мин соответственно;

• время оседания пропанта в линейном геле с концентрацией полимера 1,8 и 4,2 кг/$м^3$ составило 5 и 30 мин соответственно.

На основании полученных результатов сделан вывод, что скорость оседания керамического пропанта фракции 16/20 в жидкости ГРП на основе ПАА в 24 раза ниже, чем скорость оседания пропанта в линейном геле при концентрации 2 л/$м^3$ (0,2 мм/с и 4,83 мм/с соответственно) и в 32 раза ниже при концентрации 4 л/$м^3$ (0,03 мм/с и 0,96 мм/с соответственно) в статических условиях (рис.7).

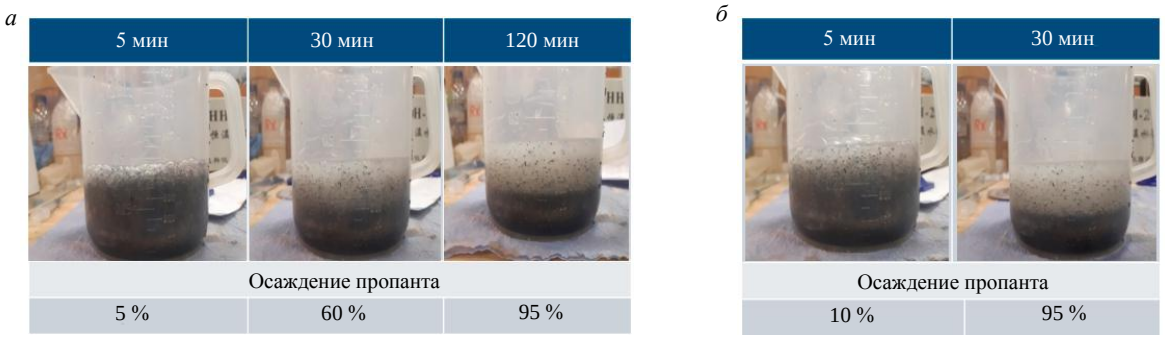


Рис.7. Время осаждения частиц пропанта в анионном (*а*) и линейном гуаровом геле (*б*) в статических условиях

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Ввиду того, что линейный гель, как было определено раннее, обладает существенно меньшими вязкоупругими свойствами, чем синтетический полимер, можно заключить, что увеличение пескоудерживающей способности жидкостей на основе ПАА напрямую связано с более выраженной упругостью, компенсирующей потери вязкости жидкости с течением времени и при воздействии на нее внешних нагрузок.

Заключение

Тенденции последних лет, определяющие стремительное увеличение проведения операций гидроразрыва пласта в нетрадиционных коллекторах с крайне ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами, а также постепенный переход от стандартных дизайнов ГРП на сшитом гуаровом геле в пользу гибридных и дизайнов с применением понизителей трения на основе полиакриламида, обуславливают актуальность проблемы определения влияния вязкоупругих свойств синтетических жидкостей ГРП на их пескоудерживающую способность.

Проведенное исследование направлено на фундаментальное обоснование влияния вязкоупругих свойств технологических жидкостей ГРП на эффективность переноса и удержания расклинивающего агента. Ранние подходы к оценке пескоудерживающих свойств утверждают, что ключевую роль в удержании пропанта играет вязкость жидкости, однако результаты проведенных исследований подтверждают значительное влияние упругих свойств полимерной системы на пескоудерживающую способность, особенно при применении низковязких синтетических жидкостей на основе полиакриламида.

Анализ изучения природы вязкоупругого поведения полимерных жидкостей, а также результаты проведенных лабораторных исследований позволили сделать следующие выводы:

• жидкости ГРП на основе ПАА имеют значительно более низкую эффективную вязкость по сравнению с гуаровыми гелями (в 2,2-2,6 раза), что обусловлено меньшей молекулярной массой и размером молекул синтетических полимеров, чем у линейных гуаровых гелей;

• время релаксации λ для синтетической жидкости ГРП на основе ПАА составило 20,9 с, что в 1,99 раза больше, чем у линейного гуарового геля (10,5 с);

• более высокие значения N_1 (в 4 раза выше при скорости сдвига 80 $с^{-1}$) и времени релаксации λ указывают на более эффективное формирование упругих сил, препятствующих осаждению РА;

• лабораторные исследования по оседанию пропанта в статических условиях показали, что время оседания частиц в жидкости ГРП на основе ПАА достигает 120 и 960 мин при концентрации 2 и 4 $л/м^3$ соответственно, в то время как для линейного геля этот показатель составляет 5 и 30 мин при сопоставимых концентрациях активного вещества. Таким образом, скорость оседания РА в синтетической жидкости ГРП оказалась в 24-32 раза ниже, чем в линейном гуаровом геле.

Проведенные исследования позволили теоретически и экспериментально обосновать эффективность применения низковязких жидкостей ГРП на основе ПАА, обладающих выраженными вязкоупругими свойствами, с целью интенсификации добычи углеводородов из залежей с низкими фильтрационно-емкостными свойствами. Благодаря улучшенным упругим характеристикам синтетические жидкости обеспечивают эффективное удержание расклинивающего агента по всей полудлине трещины ГРП при меньшей вязкости системы, что способствует увеличению длины трещины гидроразрыва и снижению риска ее вертикального прорыва в вышележащие и нижележащие водонасыщенные пропластки. Низкая вязкость жидкостей ГРП на основе ПАА облегчает последующую отработку жидкости из призабойной зоны пласта, сокращая эксплуатационные расходы и сводя к минимуму риск кольматации призабойной зоны продуктами реакции с пластовыми флюидами.

Таким образом, исследование подтверждает перспективность перехода от высоковязких гелей к вязкоупругим низковязким системам на основе полиакриламида, что открывает новые возможности для технологически эффективной и рентабельной разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Al-Hajri S., Negash B.M., Rahman M.M. et al.* Perspective Review of Polymers as Additives in Water-Based Fracturing Fluids // ACS Omega. 2022. Vol. 7. Iss. 9. P. 7431-7443. DOI: 10.1021/acsomega.1c06739

2. *Садыков А.М., Сирбаев Р.И., Ерастов С.А. и др.* Влияние жидкостей гидроразрыва пласта на остаточную проводимость проппантной пачки и фильтрационные свойства низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 7. С. 52-57. DOI: 10.24887/0028-2448-2023-7-52-57

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Feng Liang, Al-Muntasheri G., Ow H., Cox J.* Reduced-Polymer-Loading, High-Temperature Fracturing Fluids by Use of Nanocrosslinkers // SPE Journal. 2017. Vol. 22. Iss. 2. P. 622-631. DOI: 10.2118/177469-PA

4. *Skauge A., Zamani N., Jacobsen J.G. et al.* Polymer Flow in Porous Media: Relevance to Enhanced Oil Recovery // Colloids and Interfaces. 2018. Vol. 2. Iss. 3. № 27. DOI: 10.3390/colloids2030027

5. *Yang Zhang, Shuyue Xiao, Jincheng Mao et al.* Construction of a Novel Fracturing Fluid with High Viscoelasticity Induced by Mixed Micelles // SPE Journal. 2023. Vol. 28. Iss. 4. P. 2080-2093. DOI: 10.2118/214670-PA

6. *Rock A., Hincapie R.E., Tahir M. et al.* On the Role of Polymer Viscoelasticity in Enhanced Oil Recovery: Extensive Laboratory Data and Review // Polymers. 2020. Vol. 12. Iss. 10. № 2276. DOI: 10.3390/polym12102276

7. *Shengming Huang, Guancheng Jiang, Zilun Chang et al.* Investigation of Novel Modified Nanoparticle-Enhanced Viscoelastic Surfactant Clean Fracturing Fluid System for Improving Oil Recovery in Low-Permeability Reservoirs // SPE Journal. 2025. Vol. 30. Iss. 11. P. 7177-7191. DOI: 10.2118/230307-PA

8. *Shenglong Shi, Jinsheng Sun, Kaihe Lv et al.* Comparative Studies on Thickeners as Hydraulic Fracturing Fluids: Suspension versus Powder // Gels. 2022. Vol. 8. Iss. 11. № 722. DOI: 10.3390/gels8110722

9. *Biheri G., Imqam A.* Proppant Transport Using High-Viscosity Friction Reducer Fracture Fluids at High-Temperature Environment // SPE Journal. 2022. Vol. 27. Iss. 1. P. 60-76. DOI: 10.2118/206750-PA

10. *Singh A., Xinghui Liu, Jiehao Wang, Rijken M.C.M.* Novel Learnings of Proppant Transport Behavior in Unconventional Hydraulic Fractures // SPE Journal. 2022. Vol. 27. Iss. 5. P. 2980-3000. DOI: 10.2118/204135-PA

11. *Tomomewo O.S., Mann M., Anyim L. et al.* Maximizing the Proppant Carrying and Viscoelastic Properties of the Bakken Hypersaline-Produced Water with High-Viscosity Friction Reducers for Sustainable Applications // SPE Journal. 2022. Vol. 27. Iss. 6. P. 3688-3703. DOI: 10.2118/200809-PA

12. *Zeynalli M., Al-Shalabi E.W., Waleed A.* An Extended Unified Viscoelastic Model for Predicting Polymer Apparent Viscosity at Different Shear Rates // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2023. Vol. 26. Iss. 1. P. 99-121. DOI: 10.2118/206010-PA

13. *Costanzo S., Qian Huang, Ianniruberto G. et al.* Shear and Extensional Rheology of Polystyrene Melts and Solutions with the Same Number of Entanglements // Macromolecules. 2016. Vol. 49. Iss. 10. P. 3925-3935. DOI: 10.1021/acs.macromol.6b00409

14. *Lotfollahi M., Farajzadeh R., Delshad M. et al.* Mechanistic Simulation of Polymer Injectivity in Field Tests // SPE Journal. 2016. Vol. 21. Iss. 4. P. 1178-1191. DOI: 10.2118/174665-PA

15. *Alotaibi M.A., Miskimins J.* Slickwater Proppant Transport in Hydraulic Fractures: New Experimental Findings and Scalable Correlation // SPE Production & Operations. 2018. Vol. 33. Iss. 2. P. 164-178. DOI: 10.2118/174828-PA

16. *Azad M.S.* Characterization of Nonlinear Viscoelastic Properties of Enhanced Oil Recovery Polymer Systems Using Steady-Shear Rheometry // SPE Journal. 2023. Vol. 28. Iss. 2. P. 664-682. DOI: 10.2118/212824-PA

17. *Åsen S.M., Stavland A., Strand D., Hiorth A.* An Experimental Investigation of Polymer Mechanical Degradation at the Centimeter and Meter Scale // SPE Journal. 2019. Vol. 24. Iss. 4. P. 1700-1713. DOI: 10.2118/190225-PA

18. *Costanzo S., Ianniruberto G., Marrucci G., Vlassopoulos D.* Measuring and assessing first and second normal stress differences of polymeric fluids with a modular cone-partitioned plate geometry // Rheologica Acta. 2018. Vol. 57. Iss. 5. P. 363-376. DOI: 10.1007/s00397-018-1080-1

19. *Xiaojing Ge, Imqam A.* Laboratory Comparative Study of Anionic and Cationic High-Viscosity Friction Reducers in Moderate to Extremely High Total Dissolved Solids Environments // SPE Journal. 2023. Vol. 28. Iss. 2. P. 876-893. DOI: 10.2118/212298-PA

20. *Куличихин В.Г., Малкин А.Я., Френкин Э.И., Семаков А.В.* Измерения вязкоупругих свойств межфазных слоев на поверхности жидкости с помощью новой экспериментальной техники // Коллоидный журнал. 2019. Т. 81. № 6. С. 717-723. DOI: 10.1134/S0023291219060090

21. *Arnipall S.K., Ergun K.* Settling Velocity of Particles in Viscoelastic Fluids: A Comparison of the Shear-Viscosity and Elasticity Effects // SPE Journal. 2018. Vol. 23. Iss. 5. P. 1689-1705. DOI: 10.2118/187255-PA

22. *Azad M.S., Japan J.T.* Extensional Effects during Viscoelastic Polymer Flooding: Understanding Unresolved Challenges // SPE Journal. 2020. Vol. 25. Iss. 4. P. 1827-1841. DOI: 10.2118/201112-PA

23. *Силин М.А., Магадова Л.А., Крисанова П.К. и др.* Возможности осцилляционного тестирования в промысловой химии // Нефтяное хозяйство. 2024. № 4. С. 97-102. DOI: 10.24887/0028-2448-2024-4-97-102

24. *Логинова М.Е., Агзамов Ф.А., Исмаков Р.А.* Исследование вязкоупругих свойств буферных жидкостей для повышения качества крепления скважин // Промышленное производство и использование эластомеров. 2022. № 3-4. С. 39-48. DOI: 10.24412/2071-8268-2022-3-4-39-48

25. *McCormack K.L., McLennan J.D., Jagniecki E.A., McPherson B.J.* Discrete Measurements of the Least Horizontal Principal Stress from Core Data: An Application of Viscoelastic Stress Relaxation // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. 2023. Vol. 26. Iss. 3. P. 827-841. DOI: 10.2118/214669-PA

26. *Zhenming Xu, Xianzhi Song, Zhaopeng Zhu.* Development of Elastic Drag Coefficient Model and Explicit Terminal Settling Velocity Equation for Particles in Viscoelastic Fluids // SPE Journal. 2020. Vol. 25. Iss. 6. P. 2962-2983. DOI: 10.2118/201194-PA

27. *Tao Lin Sun, Feng Luo, Wei Hong et al.* Bulk Energy Dissipation Mechanism for the Fracture of Tough and Self-Healing Hydrogels // Macromolecules. 2017. Vol. 50. Iss. 7. P. 2923-2931. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b00162

28. *Zare Y., Rhee K.Y.* Expression of normal stress difference and relaxation modulus for ternary nanocomposites containing biodegradable polymers and carbon nanotubes by storage and loss modulus data // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 158. P. 162-168. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.076

29. *Kazemi A., Norouzi M., Nejad A.A. et al.* An experimental study on the role and contribution of the first normal stress difference and elongational viscosity in immiscible viscoelastic Saffman-Taylor instability // Chemical Engineering Research and Design. 2023. Vol. 197. P. 211-227. DOI: 10.1016/j.cherd.2023.07.036

30. *Xiaojing Ge, Imqam A.* How Anions and Cations Impact the Viscosity and Viscoelasticity of High-Viscosity Friction Reducers // SPE Journal. 2024. Vol. 29. Iss. 2. P. 1076-1090. DOI: 10.2118/218009-PA

31. *Кашапов Д.В., Шакиров Л.Р.* Математическое моделирование оседания пропанта в горизонтальной скважине при проведении операции гидравлического разрыва пласта на маловязкой жидкости // Бурение и нефть. 2021. № 7-8. С. 60-65.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Rixing Zhang, Nasr-El-Din H., Xiaochun Jin et al.* Multiscale Investigation of a Less-Damaging Friction Reducer to Mitigate Formation Damage in Unconventional Shale Reservoirs // Improved Oil and Gas Recovery. 2019. Vol. 3. 18 p. DOI: 10.14800/IOGR.455

33. *Hai Qu, Yang Xu, Jun Hong et al.* Experimental and Visual Analysis of Proppant-Slickwater Flow in a Large-Scaled Rough Fracture // SPE Journal. 2023. Vol. 28. Iss. 2. P. 477-495. DOI: 10.2118/212283-PA

34. *Hang Xu, Fujian Zhou, Hao Wu et al.* Experimental Research on the Proppant Settling and Transport Characteristics of Silica Gel-Based Fracturing Fluid // SPE Journal. 2024. Vol. 29. Iss. 3. P. 1321-1336. DOI: 10.2118/218381-PA

35. *Kolle J.J., Mueller A.C., Baumgartner S., Cuthill D.* Modeling Proppant Transport in Perforated Casing Based on Surface Testing // SPE Drilling & Completion. 2023. Vol. 38. Iss. 2. P. 358-369. DOI: 10.2118/209178-PA

***Авторы*: Динис Вадимович Имангулов,** *аспирант* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *dinis.imangulov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8984-7974*, **Александр Иосифович Пономарев,** *д-р техн. наук, профессор* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-0483-7732*, **Денис Вагизович Кашапов,** *канд. техн. наук, доцент* (*Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Республика Башкортостан, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-6467-0191*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0