

Влияние реологических параметров жидкости разрыва на геометрию трещины гидроразрыва пласта в терригенных резервуарах

В.В. Савельев*, И.Н. Огнев

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Гидроразрыв пласта – технологически сложная процедура, на которую влияют многие факторы. Некоторые из них не могут быть изменены, например, геомеханические параметры целевого пласта или ориентация основных напряжений в этом пласте. Но другие параметры могут быть отрегулированы: тип пропанга, тип жидкости или режим закачки. В статье проведено моделирование влияния реологических параметров жидкости разрыва на геометрию трещины. При создании моделей были использованы два программных продукта: PH-GRID от НК «Роснефть» и FracPRO от GTI Energy, а также проведены аналитические расчеты. Созданы идентичные модели, в которых изменялись реологические параметры, и проанализированы изменения в геометрии трещин. В итоге получены зависимости изменения геометрии трещин от реологических параметров жидкости разрыва. Представленные теоретические данные и зависимости могут помочь специалистам сформировать представление о процессах, происходящих при гидроразрыве пласта, и более осознанно подходить к выполнению расчетов.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, реологические свойства жидкости разрыва, моделирование гидроразрыва пласта, геометрия трещины гидроразрыва

Для цитирования: Савельев В.В., Огнев И.Н. (2023). Влияние реологических параметров жидкости разрыва на геометрию трещины гидроразрыва пласта в терригенных резервуарах. *Георесурсы*, 25(4), с. 138–148. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.12>

1. Введение

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – это один из старейших методов стимуляции скважин, который был впервые применен в 1940-х гг. Согласно исследованиям (Montgomery, Smith, 2010), около 60% всех пробуренных скважин подвергаются гидравлическому разрыву. Эта технология подходит для коллекторов с низкой, умеренной и даже высокой проницаемостью (Chekhonin, Levonyan, 2012; Economides et al., 2002; Smith et al., 1987).

Одним из наиболее важных факторов, обеспечивающих успех процедуры гидроразрыва пласта, является контроль геометрии трещины. Добиться необходимой геометрии трещины можно путём вариации реологических характеристик жидкости разрыва. Наиболее распространенным типом жидкости для гидроразрыва пласта являются шитые полимерные системы. Большинство этих жидкостей неньютоновские и, следовательно, могут демонстрировать разную кажущуюся вязкость в зависимости от приложенной скорости сдвига (рис. 1) (Bird, 1987).

Поведение потока ньютоновской жидкости можно выразить следующим образом:

$$\tau = \mu \cdot \gamma, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига (Па), μ – кажущаяся вязкость (Па·с), γ – скорость сдвига (с⁻¹).

Существует множество реологических моделей, описывающих неньютоновские жидкости; самая известная из них – степенная модель (Bird, 1987):

$$\tau = K \cdot \gamma^n, \quad (2)$$

$$\tau = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига (Па), μ – кажущаяся вязкость при скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (Па·с), K – показатель консистенции (Па·сⁿ), n – показатель текучести (безразмерный), $\dot{\gamma}$ – разность скоростей между плоскостями, деленная на расстояние между плоскостями (скорость сдвига, с⁻¹). Все эти параметры измеряются при определенной температуре.

На настоящий момент именно степенная модель (подробнее рассмотрена далее в разделе 2.3) заложена в основу расчетов при моделировании поведения жидкости разрыва в большинстве современных коммерческих симуляторов ГРП. Примерами использования степенного закона могут служить модели Planar 3D и Pseudo 3D, применяемые в симуляторах PH-GRID и FracPRO соответственно.

Влияние реологии жидкости разрыва на поведение трещин было проанализировано экспериментально (de Pater, Dong, 2007). Однако, исследований, посвященных именно моделированию влияния реологических характеристик на геометрию трещин ГРП крайне мало (Wrobel et al., 2021). Данная проблема актуальна и в свете развития современных программных продуктов и подходов к моделированию трещин ГРП (Ахтямов и др., 2018). В этой связи, целью настоящего исследования является определение влияния реологических параметров жидкости разрыва на геометрию трещины с помощью программных продуктов для моделирования гидроразрыва пласта.

* Ответственный автор: Владислав Владимирович Савельев
e-mail: v.savelev7878@gmail.com

© 2023 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

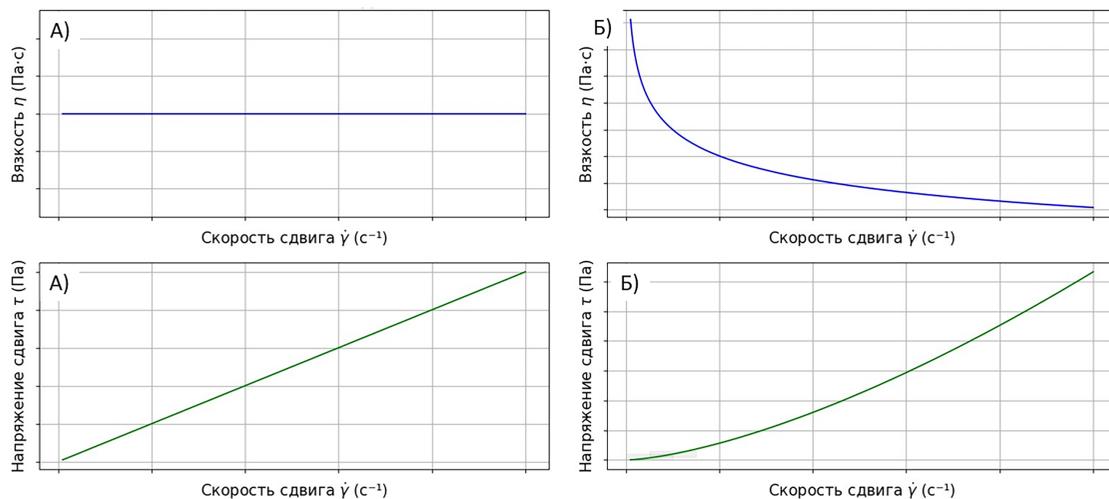


Рис. 1. Зависимость вязкости и напряжения сдвига от скорости сдвига для ньютоновской (А) и неньютоновской жидкостей (Б)

Для достижения данной цели потребуется выполнение ряда задач: построение геомеханической модели, проведение экспериментов с варьированием реологических параметров в программных симуляторах, построение аналитической модели, анализ полученных результатов и их значимости для нефтегазовой отрасли.

2. Материалы и методы

2.1 Описание используемых моделей

В настоящей работе используются следующие инструменты для создания моделей ГРП и оценки влияния реологических параметров жидкости разрыва на геометрию трещины (табл. 1):

- аналитические расчеты 2D модели KGD (Kristianovich – Geertsma – de Klerk) на основе уравнений (Economides et al., 2002);
- симулятор ГРП РН-ГРИД, модель Planar 3D (Ахтямов и др., 2018);
- симулятор ГРП FracPRO, модель Pseudo 3D (Settari, Cleary, 1986).

Для удобства пользователя, в обоих обозначенных выше симуляторах существует база данных пропантов, жидкостей, труб, кислот, геомеханических свойств пород, содержащая в себе наиболее распространенные в индустрии характеристики и шаблонные значения данных параметров. Реологические параметры выбирались в диапазоне проведения типовой процедуры ГРП. Геомеханические параметры пласта задавались типовыми для Западной Сибири.

Параметры сетки, используемые в РН-ГРИД при расчетах (выбраны в соответствии с рекомендациями разработчиков данного ПО):

- верхняя и нижняя границы расчетной области вручную выбирались для каждого расчета, чтобы гидравлическая высота трещины не достигала границ расчетной области;
- полудлина расчетной области также выбиралась вручную, чтобы трещина не достигала края расчетной области, но при этом занимала 70–80% расчетной области;
- был выбран равномерный тип сетки. Размер ячейки по вертикали: 0.1 м, размер ячейки по горизонтали 0.5 м. В соответствии с заданными параметрами автоматически рассчитывалось количество узлов сетки по вертикали и по горизонтали, в зависимости от высоты и полудлины расчетной области.

2.2 Аналитическая 2D модель

Расчеты проводились с использованием формул упрощенной модели KGD для сравнения результатов с программными моделями и выявления трендов. Упрощение заключается в том, что в этой модели утечки игнорируются. Данная модель служит отправной точкой для демонстрации трендов. Все дальнейшие уравнения подробно описаны в работе (Economides et al., 2002).

Сначала, определим константу C_1' , которая используется для дальнейших вычислений по модели KGD:

$$C_1' = \left(\frac{16}{21\pi^3} \right)^{\frac{1}{6}} = 0.539 \quad (4)$$

Характеристика	Модель Pseudo 3D-Lumped	Модель Planar 3D
Форма трещины	Эллиптический контур	Любая планарная форма
Подмодель упругости	3D	2D
Подмодели гидродинамики и переноса пропанта	Псевдодвумерное течение, одно уравнение переноса для усредненной смеси пропанта	Истинное 2D течение, отдельное уравнение переноса для каждого типа пропанта
Сопряжение упругой и гидродинамической подмоделей	Упрощенное	Полное
Учет эффектов при течении пропанта	Осаждение, глобальное застревание	Осаждение, торможение/ускорение, локальное застревание

Табл. 1. Основные характеристики используемых моделей. Информация с сайта <https://rn.digital/rngrid/> (Обзор возможностей РН-ГРИД. ООО «РН-БашНИПИнефть»)

Теперь может быть вычислена константа C_1 . Она является промежуточным звеном для вычисления геометрии трещины. Данная константа представляет собой физическую характеристику геометрии трещины на основе таких параметров, как скорость закачки, модуль плоской деформации, вязкость жидкости и высота трещины. Здесь используется та же скорость закачки, что и в программных моделях. Высота в этой модели постоянна. Вязкость жидкости переменная. C_1 можно рассчитать следующим образом:

$$C_1 = C'_1 * \left(\frac{q_i^3 E'}{\mu h_f^3} \right)^{\frac{1}{6}} \tag{5}$$

где q_i – скорость закачки (м³/мин), E' – модуль плоской деформации (Па), μ – вязкость (Па·с), h_f – высота трещины (м).

После этого может быть рассчитана полудлина трещины в определенный момент времени:

$$x_f = c_1 t^{\frac{2}{3}} \tag{6}$$

где t – время закачки (с).

Тогда, зная полудлину трещины, можно рассчитать максимальную ширину трещины:

$$w_w = 3.22 \left(\frac{\mu q_i x_f^2}{E' h_f} \right)^{\frac{1}{4}} \tag{7}$$

После этого, при необходимости, можно рассчитать среднюю ширину трещины следующим образом:

$$\bar{w} = \gamma w_w \tag{8}$$

где $\gamma = \pi/4 = 0.785$.

Недостатком представленной модели можно считать то, что она не включает реологическую модель поведения неньютоновской жидкости по степенному закону. Модель KGD учитывает только вязкость жидкости при определенной скорости сдвига и определенных значениях n и K . В рамках данной работы аналитическая модель используется для дополнительной верификации результатов расчетов программных моделей.

2.3 Программные модели Planar 3D и Pseudo 3D

Моделирование проводилось в двух разных программах: РН-ГРИД (модель Planar 3D) и FracPRO (модель Pseudo 3D). В обоих случаях модели создавались

максимально идентичными: использовалась одна и та же геомеханическая модель, одинаковая конструкция скважины, одни и те же свойства жидкости и один и тот же график закачки.

Было проведено два типа моделирования.

1. Моделирование ГРП в простой гомогенной однослойной среде. В модели создан один сланцевый пласт с использованием типичных геомеханических параметров для сланцев Западной Сибири. Данная модель позволяет исключить взаимодействие между слоями (рис. 2А).

2. Моделирование ГРП в гетерогенной среде, построенной на основе реальной скважины Западной Сибири. Гетерогенная модель предполагает возможность резкого увеличения высоты трещины (рис. 2Б).

В обоих случаях использовалась простая вертикальная скважина. Ее параметры показаны на рис. 3.

На рис. 4 показана карта ширины трещины с обозначениями её геометрических параметров.

Во всех случаях закачивалась небольшая порция чистой жидкости ГРП без пропанта, а моделирование останавливалось без смыкания трещины. Скорость закачки составляла 3 м³/мин, что является типичным значением

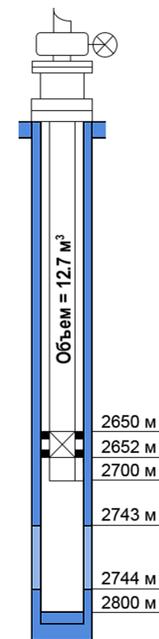


Рис. 3. Конструкция скважины, используемая при моделировании

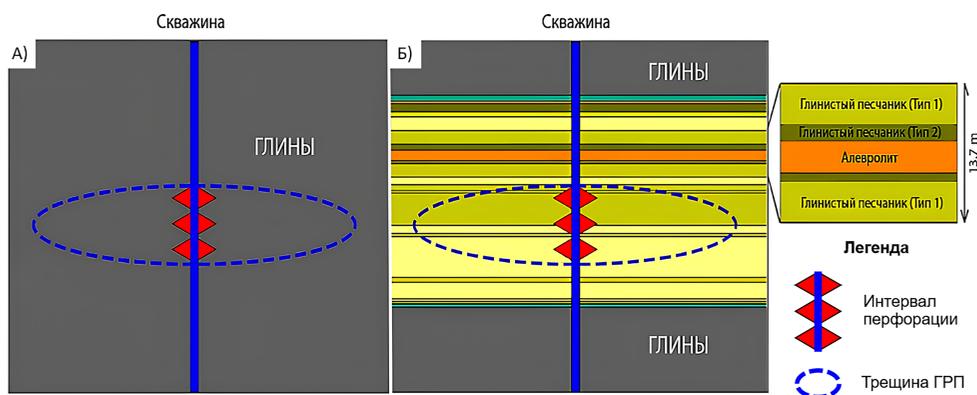


Рис. 2. Два типа моделей, на которых выполнялось программное моделирование: гомогенная модель с плавным ростом трещины во всех направлениях (А), многослойная модель, построенная на основе реальной скважины, в которой возможен резкий рост высоты трещины (Б)

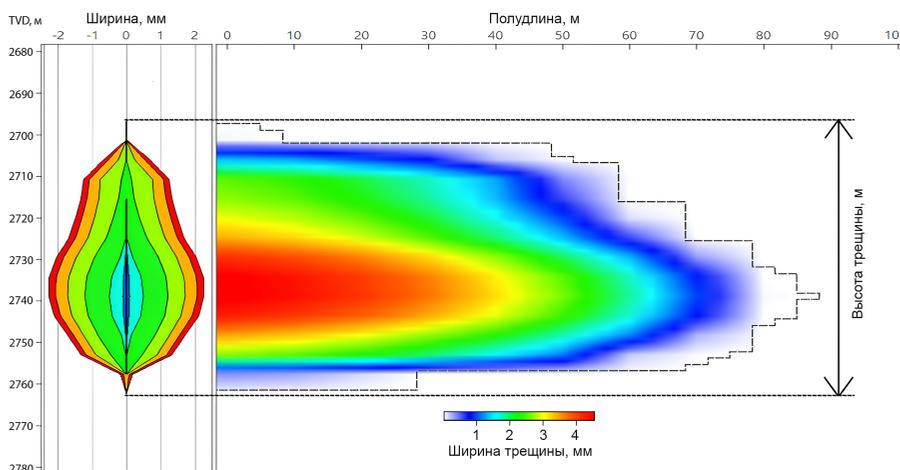


Рис. 4. Карта геометрии трещины с указанием ширины трещины, полудлины и высоты (РН-ГРИД)

для ГРП. Общее время закачки составляло 5 минут. Этого времени достаточно, чтобы выявить тенденции изменения геометрии трещины ГРП. Общий закачиваемый объем составил 15 м³. Такие параметры закачки были выбраны по той причине, что это сокращает время моделирования, при том, что этого времени достаточно для выявления изменений в геометрии трещины. Во всех моделях были выбраны одинаковые параметры перфорации (табл. 2). Был учтен объем скважины, и вся запланированная к закачке жидкость ГРП поступила в пласт.

Важно отметить, что используемая в программных расчетах степенная модель неньютоновской жидкости не может полностью описать сложные характеристики жидкости для гидроразрыва с плато вязкости, когда вязкость флюида остается практически постоянной в широком

диапазоне скоростей сдвига. Однако, для моделирования гидроразрыва пласта нет необходимости в применении таких сложных моделей как, например, модель Карро, описывающих плато вязкости (Bird, 1987; Rao, 2014). Усеченная степенная модель является достаточной для описания реологии в контексте ГРП (Wrobel, 2020a). Смысл усеченной степенной модели заключается в «обрезании» кривой вязкости на определенных скоростях сдвига для лучшего соответствия реальным данным. Более того, для того чтобы избежать плато при очень низких и при очень высоких скоростях сдвига при ГРП, существует множество технологий, обеспечивающих необходимые свойства для жидкости разрыва (Wang et al., 2022).

Еще одним аргументом в пользу практического использования степенного закона может служить следующий факт: очень высокие скорости сдвига встречаются лишь на вершине трещины, а средняя скорость сдвига в трещине гораздо ниже, чем на её вершине (Wrobel et al., 2021).

На рис. 5 представлены параметры жидкостей, использованных в данной работе (при 20 °С) и возможные границы применения стандартного степенного закона. Точные границы возможно определить лишь в ходе лабораторных исследований. Но, как демонстрируют зависимости на рис. 5, плато вязкости не достигается и в настоящей работе в этом нет острой необходимости.

Интервал перфорации	1 м (2743 м – 2744 м)
Общий закачиваемый объем	15 м ³
Скорость закачки	3 м ³ /мин
Общее время закачки	5 мин
Траектория скважины	Вертикальная
Отчетный шаг	1 мин

Табл. 2. Свойства программных моделей

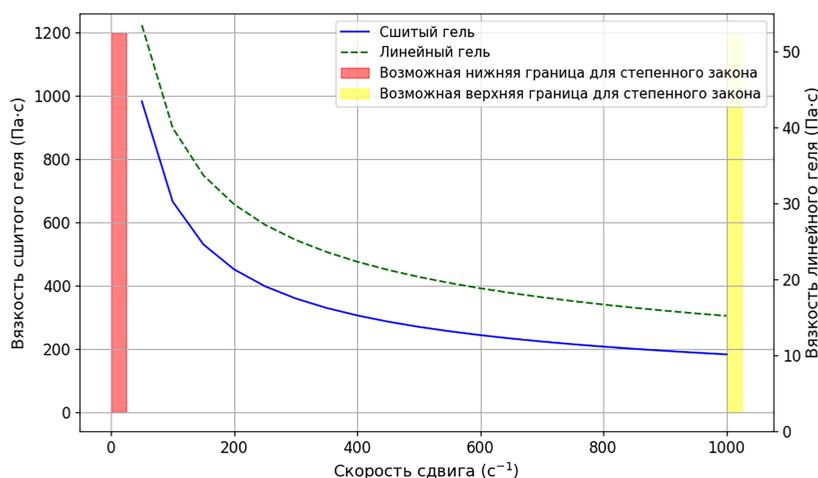


Рис. 5. Параметры жидкостей разрыва, использованных при моделировании и возможные границы применения стандартного степенного закона

Учитывая проведенные ранее исследования (Wrobel, 2020b; Wrobel et al., 2021), можно сказать, что и в целом при моделировании процедуры ГРП применение степенного закона для описания реологии жидкости разрыва является практически наиболее целесообразным.

2.4 Описание реологии жидкости разрыва

Степенной закон (уравнение 3) использовался для описания реологии в программных моделях. Входными данными для степенного закона являются следующие параметры, измеренные при определенной температуре:

- плотность жидкости ρ (считается постоянной),
- индекс консистенции K ,
- индекс поведения потока n (предполагается постоянным).

Для исключения влияния температуры на реологические свойства в параметрах симуляторов была задана постоянная температура от устья скважины до пласта равная 20 °С. Это означает, что реологические свойства остаются неизменными на протяжении всего процесса моделирования.

По умолчанию переменные n и K являются функциями времени, описывающими деградацию жидкости гидроразрыва пласта. Но для чистоты эксперимента их значения были намеренно установлены постоянными. Таким образом, реологические параметры, такие как кажущаяся вязкость, не изменялись со временем. Также для всех моделей заданы идентичные параметры потерь давления на трение. Для использованной скорости закачки потери давления составляют 0.036 атм/м. Этот параметр не зависит от реологии и задается как градиент перепада давления на каждый метр трубы. Относительная плотность для всех жидкостей принималась равной

плотности дистиллированной воды (0.9982 г/мл при 20 °С). Реологические параметры для моделирования выбирались следующим образом: параметр n выбирался как константа, а параметр K подбирался таким образом, чтобы вязкость при скорости сдвига 100 с⁻¹ равнялась значениям от 50 сП до 1000 сП.

Таким образом, была создана модель жидкости гидроразрыва, которая будет изменяться только в том случае, если реологические параметры этой жидкости будут изменены вручную. В данной модели исключается влияние температуры и деградация жидкости ГРП с течением времени. Влияние трения в трубах учитывается во всех случаях одинаково. Оно не зависит от реологических параметров, что исключает влияние этого фактора на геометрию трещины при варьировании реологических параметров.

Для аналитических расчетов использовалась упрощенная реологическая модель, в которой единственным параметром является вязкость. В ней не учитываются ни скорость сдвига, ни реологические параметры степенной модели n и K .

3. Результаты расчетов и моделирования

3.1 Гомогенный пласт

Аналитическая модель KGD. Эта модель не имеет расширенного описания реологии, однако вязкость учитывается при расчетах. Среда считается однородной во всех направлениях. Высота трещины считается постоянной. Построены графики зависимости геометрии от вязкости. Полученные зависимости представлены на рис. 6Б и 7Б. Поведение графиков можно объяснить уравнениями 6 и 7. Согласно этой модели, для получения более широкой и короткой трещины необходимо увеличить вязкость

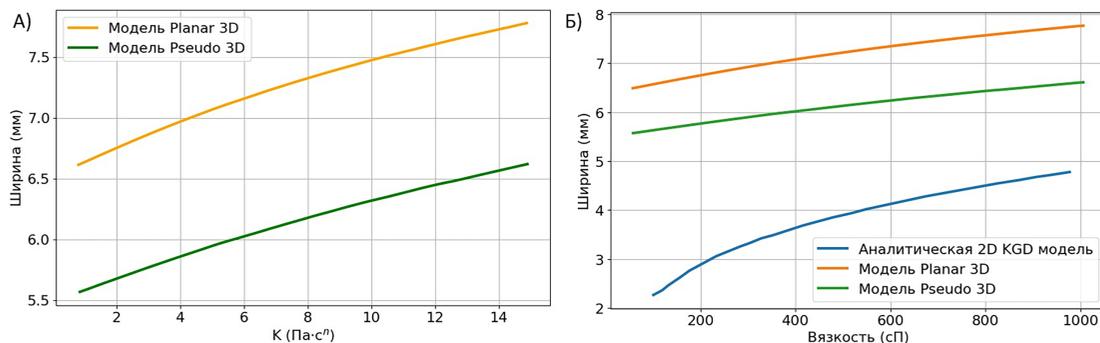


Рис. 6. Результаты расчетов зависимости ширины трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гомогенной среде

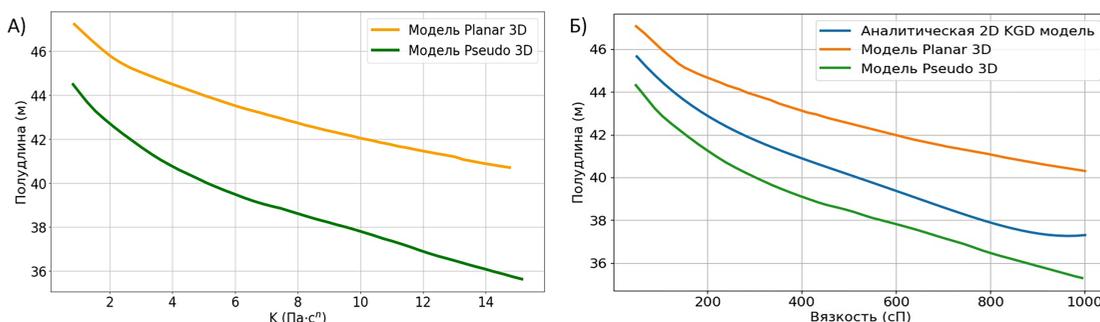


Рис. 7. Результаты расчетов полудлины трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гомогенной среде

жидкости ГРП. И наоборот, узкая и длинная трещина будет получена при использовании жидкости с низкой вязкостью (рис. 7Б). Данные расчеты являются отправной точкой для выявления трендов.

Модель Planar 3D. Эта модель предполагает однородную среду с теми же геомеханическими параметрами, что и в предыдущей модели. Основные тенденции предыдущей модели сохранены. Ширина трещины увеличивается, а полудлина и высота уменьшаются с увеличением вязкости жидкости разрыва. Таким образом, в однородной среде необходимо увеличить вязкость жидкости ГРП, чтобы получить более широкую, но меньшую по длине и высоте трещину. И наоборот, жидкость для гидроразрыва с низкой вязкостью дает более узкую, но длинную и высокую трещину. Для большей наглядности представлены зависимости геометрии трещины как от вязкости, так и от индекса консистенции K (рис. 6А, 7А, 8А). Это сделано по следующей причине: вязкость – более понятный для восприятия параметр, но в процессе процедуры ГРП она не остается постоянной, поскольку меняется при изменении скорости сдвига (уравнение 3). Вязкость анализировалась при скорости сдвига 100 c^{-1} . Более надежным параметром является индекс консистенции K . Он зависит только от температуры, которая в нашей модели является постоянной. Следовательно, K также остается постоянным независимо от скорости сдвига. Графики имеют одинаковую форму, так как в модели варьировался только индекс консистенции K , а индекс поведения потока n считался постоянным для всех жидкостей.

Модель Pseudo 3D. Эта модель по полученным результатам близка к модели Planar 3D. При этом сохраняются все тенденции геометрии трещины. Для получения более широкой, но невысокой и короткой трещины необходимо

повысить вязкость или индекс консистенции жидкости ГРП. И наоборот, для получения более узкой, но высокой и длинной трещины следует уменьшить индекс консистенции K или вязкость (рис. 6, 7, 8).

3.2 Гетерогенная среда

Модель Planar 3D. Несколько иная ситуация сложилась на гетерогенной модели, учитывающей вертикальную неоднородность. Ширина трещины ведет себя идентично гомогенным моделям: она увеличивается с увеличением вязкости и индекса консистенции. Высота ведет себя по-разному: в гомогенной модели она уменьшается с увеличением вязкости и индекса консистенции, а в гетерогенной модели ступенчато растет (рис. 8, 9). Это явление можно объяснить следующим образом. Сверху и снизу от трещины ГРП предполагается наличие очень плотных глин, в которые трещина не может прорваться. Песчаники имеют наименьшее геомеханическое напряжение. Глины имеют относительно высокое геомеханическое напряжение. Тогда для определенной вязкости (индекса консистенции) получим высоту трещины h_1 (рис. 10). Однако, теоретически, если бы имела место однородная среда без прослоя глин, высота трещины могла бы равняться h_2 . Это связано с тем, что более плотные пласты не позволяют трещине расти в высоту до тех пор, пока не будет достигнуто определенное критическое давление, позволяющее трещине прорваться через эти плотные породы. Затем трещина резко увеличивает свою высоту, пока не достигнет следующего плотного пласта, для преодоления которого требуется более высокое давление.

Тогда возникает противоречие: если давление увеличивается с увеличением вязкости и индекса консистенции K , то почему в гомогенной модели высота трещины

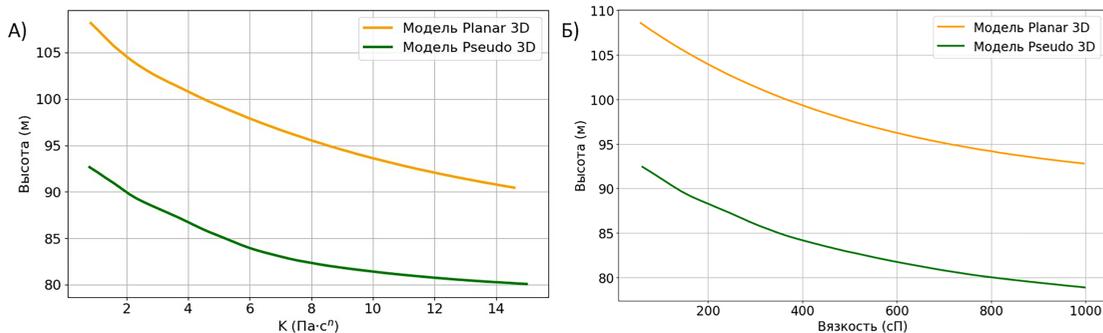


Рис. 8. Результаты расчетов высоты трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гомогенной среде

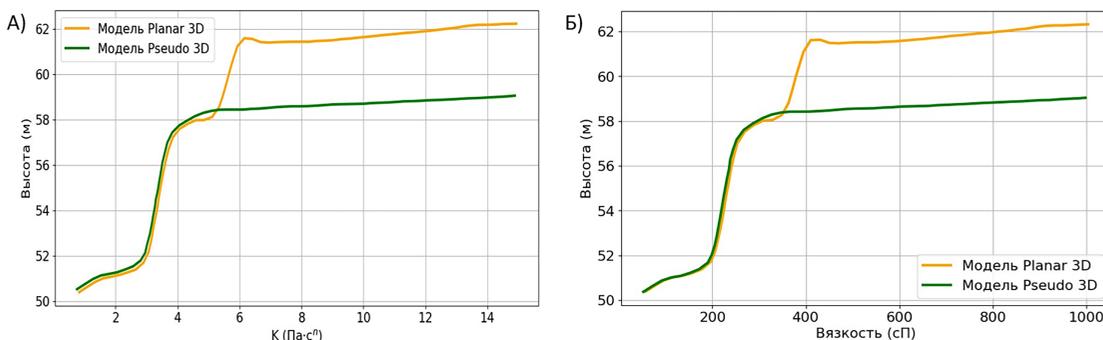


Рис. 9. Результаты расчетов зависимости высоты трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гетерогенной среде

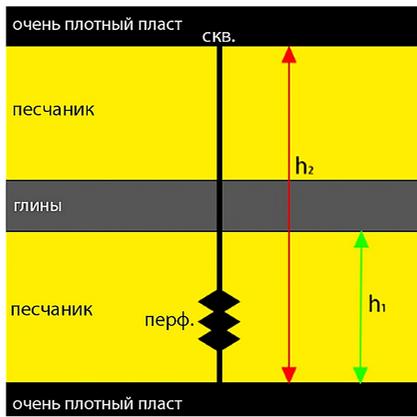


Рис. 10. Схематическое объяснение изменения высоты трещины в гетерогенной модели. h_1 – высота трещины при определенной вязкости и индексе консистенции жидкости разрыва. h_2 – высота трещины при той же вязкости и индексе консистенции жидкости разрыва, но при условии отсутствия пласта глин, сдерживающего рост трещины в высоту

не увеличивается пропорционально увеличению вязкости, а, наоборот, уменьшается.

Известно, что ширина трещины растет с увеличением вязкости. Видно, что при одинаковом графике закачки в случае однородного пласта рост ширины слабый (разница между значениями для наиболее вязкой жидкости и для самой невязкой жидкости составляет 1 мм) (рис. 6). Напротив, в гетерогенной модели с идентичным графиком закачки наблюдается более выраженное увеличение ширины (разница между значениями для наиболее вязкой жидкости и для самой невязкой жидкости составляет 4 мм) (рис. 11). То есть, вязкой жидкости трудно попасть в удаленные части трещины, а увеличить ширину трещины в прискважинной зоне легче. Тогда становится понятно, почему жидкость с малой вязкостью создает узкую, но высокую трещину. Тем не менее, этот факт

не мешает жидкости с высокой вязкостью создавать высокое давление в прискважинной зоне и прорывать более плотные пласты, тем самым увеличивая высоту трещины, что видно на рис. 9.

Полудлина трещины ступенчато уменьшается с каждым прорывом в новый слой по высоте. Очевидно, это связано с тем, что всегда закачивается один и тот же объем жидкости, и она по-разному распределяется в трещине (рис. 12).

Для лучшего представления полученных результатов на графике зависимости высоты трещины от вязкости жидкости для гетерогенной среды выделим три зоны в соответствии с интервалами резкого изменения геометрии (рис. 13). Эти же зоны перенесем на график высот для гомогенной модели. Отличие состоит в том, что при одинаковых значениях вязкости в случае гетерогенной модели высота увеличивается ступенчато, а в случае гомогенной модели падает равномерно.

На рис. 14 показано как изменяется геометрия трещины с изменением вязкости жидкости разрыва.

На рис. 15 показаны случаи развития трещины при различной вязкости жидкости ГРП в средах с разными геолого-геомеханическими характеристиками.

Модель Pseudo 3D. В этой модели также происходит постепенное увеличение ширины и резкое увеличение высоты трещины с одновременным падением её полудлины. Это означает, что соблюдается логика, описанная ранее, однако развитие трещины в модели Pseudo 3D во FracPRO несколько отличается от трещины Planar 3D в РН-ГРИД. Обе модели показывают одинаковую полудлину и ширину трещины при прорыве первого непроницаемого пропластка и вплоть до вязкости равной примерно 300 сП (рис. 9, 12). Далее наблюдается расхождение – трещина в модели Planar 3D прорывает второй пропласток и ее высота скачкообразно увеличивается. В случае же с Pseudo 3D происходит дальнейшее постепенное увеличение высоты

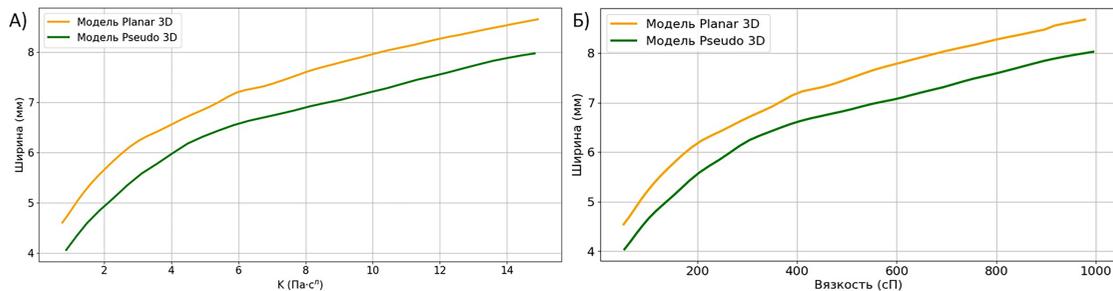


Рис. 11. Результаты расчетов зависимости ширины трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гетерогенной среде

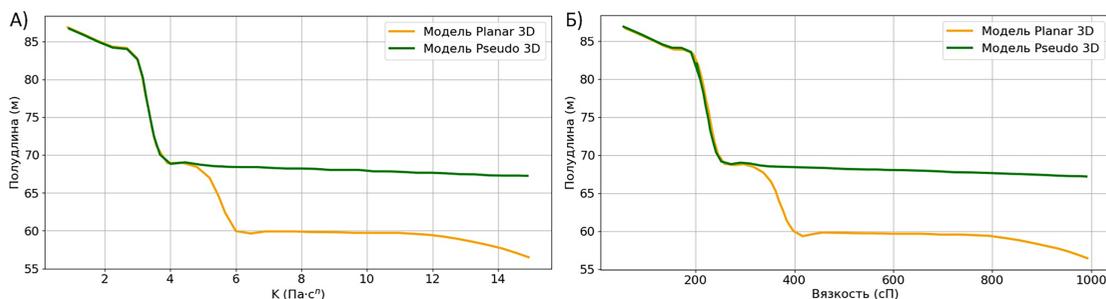


Рис. 12. Результаты расчетов зависимости полудлины трещины от индекса консистенции (А) и вязкости жидкости разрыва (Б) в гетерогенной среде

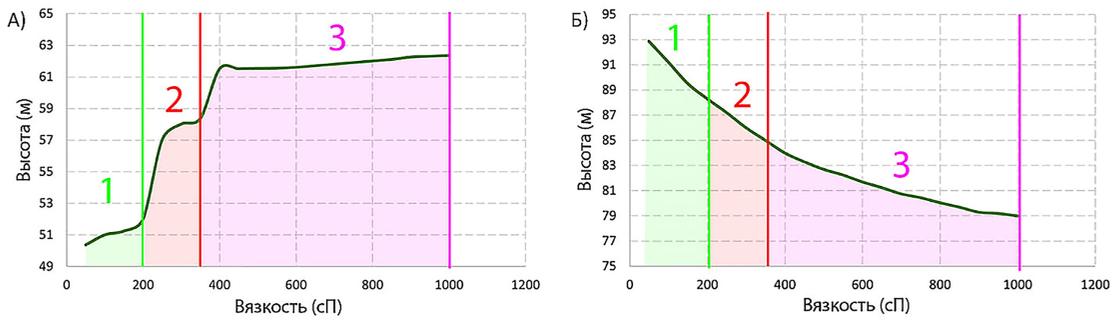


Рис. 13. Разделение вязкости на три зоны в соответствии со скачками высоты в гетерогенной модели. 1 – низкая вязкость, 2 – средняя вязкость, 3 – высокая вязкость жидкости разрыва. Зависимость высоты трещины от вязкости для гетерогенной модели (А) и для гомогенной модели (Б)

трещины без прорыва второго глинистого пропластка. При этом ширина трещины в модели Pseudo 3D на всем анализируемом интервале вязкости и индекса консистенции оказывается примерно на 0.5–0.7 мм меньше таковой у трещины в модели Planar 3D (рис. 11).

Таким образом, геометрия трещины в модели Pseudo 3D может несколько отличаться от модели Planar 3D

при одинаковых реологических свойствах жидкости разрыва. Данное различие может быть связано с применением разных моделей утечек в симуляторах, с моделированием образования глинистой корки, с учетом пороупругих эффектов в модели – с утечками жидкости в пласт повышается пластическое давление в прилегающих ячейках, а значит возрастают и смыкающие напряжения в породах.

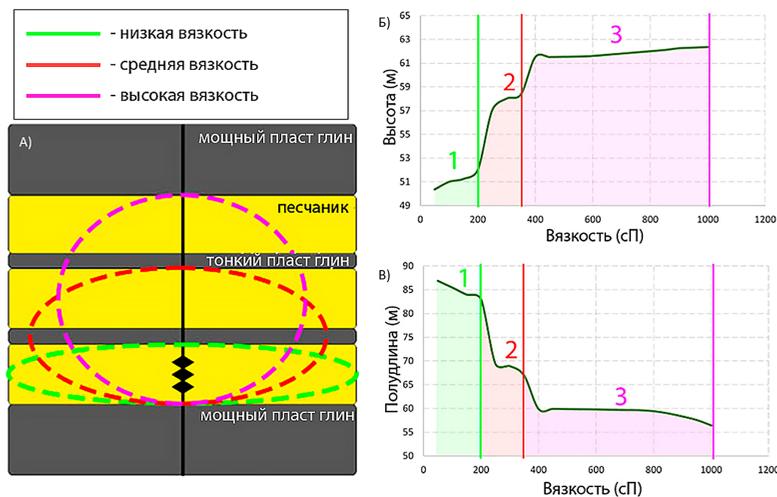


Рис. 14. Поведение параметров трещины ГРП в гетерогенной среде. Схематическое изображение формы трещины в зависимости от изменения вязкости (А); поведение высоты трещины при изменении вязкости (Б); поведение полудлины трещины при изменении вязкости (В)

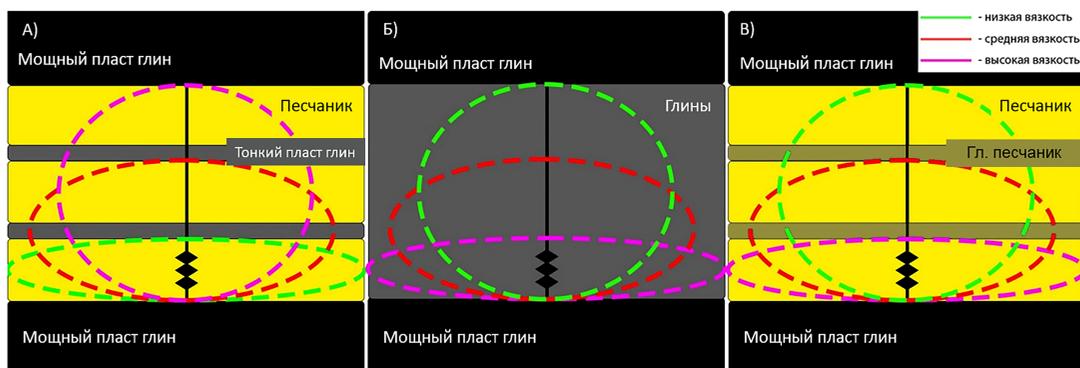


Рис. 15. Схематическое изображение геометрии трещин в различных средах. Гетерогенная модель. Пласты глины ограничивают рост трещины в высоту до тех пор, пока не будет достигнуто определенное критическое давление, создаваемое увеличением вязкости (А). Гомогенная модель. Высота трещины достигает больших значений при низкой вязкости, так как жидкости с низкой вязкостью гораздо «легче» проникать в отдаленные части трещины. Напротив, более вязкая жидкость создает более широкую трещину в приквашинной зоне и «тратит» весь свой потенциал на увеличение ширины трещины (Б). Гетерогенная модель с глинистыми песчаниками, близкими по своим геомеханическим свойствам к песчаникам (В). Тогда геометрия будет аналогична случаю (Б), так как трещина не встретит сопротивления росту в высоту

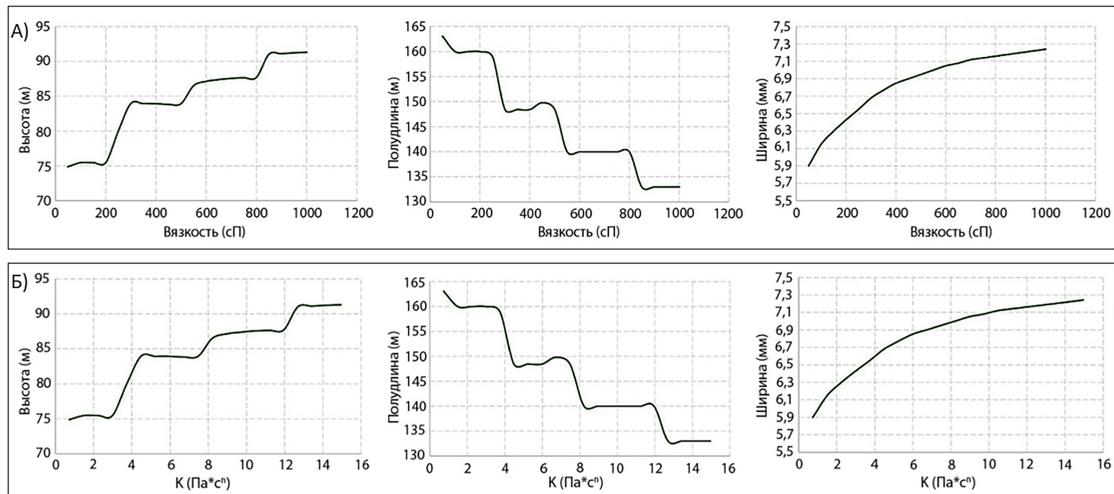


Рис. 16. Результаты, полученные в гетерогенной модели РН-ГРИД с использованием полноценного стандартного плана закачки. Зависимость высоты, полудлины и ширины трещины от вязкости жидкости разрыва (А), зависимость высоты, полудлины и ширины трещины от индекса консистенции (Б)

3.3 Гетерогенная среда с типовым планом закачки

Во всех предыдущих моделях использовался короткий план закачки, поскольку он позволял отображать тенденции изменения геометрии при изменении реологии жидкости ГРП. Однако также был создан и кейс с полноценным типовым планом закачки, используемым в ПАО «Роснефть» в РН-ГРИД на той же гетерогенной геомеханической модели. Полученные результаты продемонстрированы на рис. 16. Они подтверждают теорию о резком ступенчатом росте высоты трещины в связи прорывом плотных пластов и достижением следующего плотного пласта с увеличением вязкости и индекса консистенции жидкости разрыва. Отличие в том, что ступеней на графиках теперь стало больше, так как объем закачки значительно повысился, а значит, повысилось давление, и трещина прорывает большее количество пластов.

4. Выводы

В настоящей работе проведен анализ зависимости геометрии трещины от реологических свойств жидкости разрыва. Основные теоретические результаты работы заключаются в следующем.

- Ширина трещины увеличивается практически линейно с увеличением вязкости жидкости разрыва (индекса консистенции K).
- Полудлина трещины уменьшается с увеличением вязкости жидкости разрыва (индекса консистенции K). В случае однородной среды это происходит пропорционально росту реологических параметров (вязкости и индекса консистенции). В случае гетерогенной среды полудлина также уменьшается, но ступенчато (в соответствии с прорывами трещины в вышележащие и нижележащие горизонты).
- В однородной среде высота трещины уменьшается пропорционально увеличению реологических свойств жидкости разрыва. Однако в гетерогенной среде высота ступенчато увеличивается по мере увеличения вязкости и индекса консистенции жидкости разрыва.

С практической точки зрения, можно сделать вывод, что для создания более широкой трещины

в прискважинной зоне необходимо увеличение вязкости (индекса консистенции) жидкости разрыва. При этом, чем выше вязкость, тем короче трещина. Это может быть полезно, когда необходимо выбрать оптимальную геометрию трещины. При этом нужно отметить, что с увеличением вязкости (показателя консистенции K) в гетерогенной среде увеличивается риск прорыва в вышележащие или нижележащие горизонты, что может привести к быстрому росту обводненности.

Также было определено, что степенной закон является достаточным для моделирования гидроразрыва пласта в большей части практических приложений. Желательными, но не обязательными являются лабораторные исследования, которые позволяют обозначить верхнюю и нижнюю границу для использования усеченного степенного закона.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению № 075-15-2022-299 в рамках программы создания и развития НЦМУ «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные комментарии и замечания, способствующие улучшению работы.

Литература

- Ахтямов А.В., Макеев Г.А., Байдиюков К.Н., Муслимов У.С., Матвеев С.Н., Пестриков А.В., Резаев С.Н. (2018). Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта RN-GRID: от разработки программного обеспечения до внедрения на месторождении. *Нефтяное хозяйство*, (5), с. 94–97. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-94-97>
- Bird R.B. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids, Vol.1: Fluid Mechanics, Dynamics of Polymeric Liquids*. Wiley.
- Chekhnin E., Levonyan K. (2012). Hydraulic fracture propagation in highly permeable formations, with applications to tip screenout. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.12.006>
- de Pater C.J., Dong Y. (2007). Experimental Study of Hydraulic Fracturing in Sand as a Function of Stress and Fluid Rheology. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, College Station, Texas, U.S.A., January 2007. <https://doi.org/10.2118/105620-MS>

Economides M., Oligney R., Valkó, P. (2002). Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Alvin, TX, Orsa Press.

Geertsma J.C., Klerk F. de (1969). A Rapid Method of Predicting Aperture and Extent of Hydraulically Induced Fractures. *Journal of Petroleum Technology*, 21, pp. 1571–1581. <https://doi.org/10.2118/2458-PA>

Montgomery C.T., Smith, M.B. (2010). Hydraulic Fracturing: History of an Enduring Technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62(12), pp. 26–40. <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>

Rao M.A. (2014). Flow and Functional Models for Rheological Properties of Fluid Foods. In: *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods*. Boston, MA, Springer US. pp. 27–61. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9230-6_2

Settari A., Cleary M.P. (1986). Development and Testing of a Pseudo-Three-Dimensional Model of Hydraulic Fracture Geometry. *SPE Production Engineering*, 1(06), pp. 449–466. <https://doi.org/10.2118/10505-PA>

Smith M.B., Miller W.K., Haga J. (1987). Tip Screenout Fracturing: A Technique for Soft, Unstable Formations. *SPE Production Engineering*, 2(02), pp. 95–103. <https://doi.org/10.2118/13273-PA>

Wang M., Wu W., Chen S., Li S., Li T., Ni G., Fu Y., Zhou W. (2022). Experimental Evaluation of the Rheological Properties and Influencing Factors of Gel Fracturing Fluid Mixed with CO₂ for Shale Gas Reservoir Stimulation. *Gels*, 8, 527. <https://doi.org/10.3390/gels8090527>

Wrobel M. (2020a). An efficient algorithm of solution for the flow of generalized Newtonian fluid in channels of simple geometries. *Rheologica Acta*, 59(9), pp. 651–663. <https://doi.org/10.1007/s00397-020-01228-2>

Wrobel M. (2020b). On the application of simplified rheological models of fluid in the hydraulic fracture problems. *International Journal of Engineering Science*, 150, 103275. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103275>

Wrobel M., Mishuris G., Papanastasiou P. (2021). On the influence of fluid rheology on hydraulic fracture. *International Journal of Engineering Science*, 158, 103426. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103426>

Сведения об авторах

Владислав Владимирович Савельев – инженер НОЦ «Моделирование ТРИЗ», Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Большая Красная, д. 4
e-mail: v.savelev7878@gmail.com

Игорь Николаевич Огнев – кандидат геол.-минерал. наук, старший преподаватель, Институт геологии и нефтегазовых технологий, Казанский (Приволжский) федеральный университет

Россия, 420111, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

Статья поступила в редакцию 24.08.2023;

Принята к публикации 27.11.2023; Опубликовано 30.12.2023

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Sensitivity analysis of the fracturing fluid rheology effect on the hydraulic fracture geometry in the terrigenous reservoirs

V.V. Savelev*, I.N. Ognev

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

*Corresponding author: Vladislav V. Savelev, e-mail: v.savelev7878@gmail.com

Abstract. Hydraulic fracturing is a technologically complex procedure that is influenced by many factors. Some of them cannot be changed, such as the geomechanical parameters of the target formation or the orientation of the stresses in the formation. But other parameters can be adjusted: proppant type, fluid type or injection mode. In this paper, modelling of the effect of fracture fluid rheological parameters on fracture geometry has been carried out. Two software products, RN-GRID from Rosneft and FracPRO from GTI Energy, were used to create the models, and analytical calculations were performed. Identical models were created in which rheological parameters were changed and changes in fracture geometry were analysed. The presented theoretical data and dependencies can help specialists to form an idea of the processes that take place during the hydraulic fracturing, and more consciously approach the calculations.

Keywords: hydraulic fracturing, rheological properties of fracturing fluid, hydraulic fracturing modelling, hydraulic fracture geometry

Acknowledgements

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under agreement No. 075-15-2022-299 within the framework of the development program for a world-class Research Center “Efficient development of the global liquid hydrocarbon reserves”.

Recommended citation: Savelev V.V., Ognev I.N. (2023). Sensitivity analysis of the fracturing fluid rheology effect on the hydraulic fracture geometry in the terrigenous reservoirs. *Georesursy = Georesources*, 25(4), pp. 138–148. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.12>

References

Akhtyamov, A.V., Makeev, G.A., Baydyukov, K.N., Muslimov, U.S., Matveev, S.N., Pestrikov, A.V. & Rezaev, S.N. (2018) Corporate fracturing simulator RN-GRID: from software development to in-field implementation (Russian). *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*. 2018 (05), 94–97. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-5-94-97>

Bird R.B. (1987). *Dynamics of Polymeric Liquids, Vol.1: Fluid Mechanics, Dynamics of Polymeric Liquids*. Wiley.

Chekhonin E., Levonyan K. (2012). Hydraulic fracture propagation in highly permeable formations, with applications to tip screenout. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50, pp. 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.12.006>

de Pater C.J., Dong Y. (2007). Experimental Study of Hydraulic Fracturing in Sand as a Function of Stress and Fluid Rheology. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*, College Station, Texas, U.S.A., January 2007. <https://doi.org/10.2118/105620-MS>

Economides M., Oligney R., Valkó, P. (2002). Unified fracture design: bridging the gap between theory and practice. Alvin, TX, Orsa Press.

Geertsma J.C., Klerk F. de (1969). A Rapid Method of Predicting Aperture and Extent of Hydraulically Induced Fractures. *Journal of Petroleum Technology*, 21, pp. 1571–1581. <https://doi.org/10.2118/2458-PA>

Montgomery C.T., Smith, M.B. (2010). Hydraulic Fracturing: History of an Enduring Technology. *Journal of Petroleum Technology*, 62(12), pp. 26–40. <https://doi.org/10.2118/1210-0026-JPT>

Rao M.A. (2014). Flow and Functional Models for Rheological Properties of Fluid Foods. In: Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods. Boston, MA, Springer US. pp. 27–61. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9230-6_2.

Settari A., Cleary M.P. (1986). Development and Testing of a Pseudo-Three-Dimensional Model of Hydraulic Fracture Geometry. *SPE Production Engineering*, 1(06), pp. 449–466. <https://doi.org/10.2118/10505-PA>

Smith M.B., Miller W.K., Haga J. (1987). Tip Screenout Fracturing: A Technique for Soft, Unstable Formations. *SPE Production Engineering*, 2(02), pp. 95–103. <https://doi.org/10.2118/13273-PA>

Wang M., Wu W., Chen S., Li S., Li T., Ni G., Fu Y., Zhou W. (2022). Experimental Evaluation of the Rheological Properties and Influencing Factors of Gel Fracturing Fluid Mixed with CO₂ for Shale Gas Reservoir Stimulation. *Gels*, 8, 527. <https://doi.org/10.3390/gels8090527>

Wrobel M. (2020a). An efficient algorithm of solution for the flow of generalized Newtonian fluid in channels of simple geometries. *Rheologica Acta*, 59(9), pp. 651–663. <https://doi.org/10.1007/s00397-020-01228-2>

Wrobel M. (2020b). On the application of simplified rheological models of fluid in the hydraulic fracture problems. *International Journal of Engineering Science*, 150, 103275. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103275>

Wrobel M., Mishuris G., Papanastasiou P. (2021). On the influence of fluid rheology on hydraulic fracture. *International Journal of Engineering Science*, 158, 103426. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103426>

About the Authors

Vladislav V. Savelev – Engineer, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University
4 Bolshaya Krasnaya st., Kazan, 420111, Russian Federation
e-mail: v.savelev7878@gmail.com

Igor N. Ognev – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Institute of Geology and Petroleum Technologies, Kazan Federal University
4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420111, Russian Federation

*Manuscript received 24 August 2023;
Accepted 27 November 2023; Published 30 December 2023*