

УДК 532.5-1/9

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ДРЕНИРОВАНИЯ ПЛАСТА И ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НА ПЛАСТ С ТРЕЩИНОЙ АВТО-ГРП

Шевелёв Александр Павлович¹,
a.p.shevelev@utmn.ru

Гильманов Александр Янович¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Канонирова Елизавета Петровна¹,
stud0000123797@study.utmn.ru

¹ Тюменский государственный университет,
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А.

Актуальность представленного исследования заключена в необходимости предотвращения процесса раннего обводнения продуктивных скважин при разработке нефтеносных пластов, характеризующихся низкой проницаемостью ввиду роста числа операций по нефтедобыче, связанных с использованием технологии гидравлического разрыва пласта.

Цель: разработать математические модели для прогнозирования характерных линейных размеров зоны дренирования пласта и воздействия дисперсных частиц на пласт с трещиной автогидроразрыва пласта.

Объекты: коллекторы с низкой проницаемостью, трещина автогидроразрыва пласта, суспензия, закачиваемая в нефтеносный пласт, дисперсные частицы, добавляемые в реагент.

Методы: постановка физической задачи, составление системы уравнений механики многофазных систем, метод простых итераций для решения трансцендентного уравнения, оценка и анализ значений, прогнозируемых разработанными моделями.

Результаты. Установлено, что разработанная на основе системы уравнений механики многофазных систем математическая модель позволяет определить характерный линейный размер зоны дренирования пласта. Показано, что для представленных модельных параметров эта характеристика по величине составляет 3,65 м. Определено, что управляющими параметрами для линейного размера зоны дренирования являются концентрация частиц суспензии в смеси в нагнетательной скважине, проницаемость пласта, ширина и длина трещины. Построена математическая модель для прогнозирования воздействия дисперсных частиц закачиваемого агента на пласт. Выявлено, что при добавлении дисперсных частиц в рабочую смесь расход суспензии снижается ввиду осаждения частиц в поровых каналах. Проведена численная оценка изменения расхода суспензии при обработке трещины автогидроразрыва пласта полимер-дисперсной смесью. Для представленных модельных параметров снижение величины расхода составляет примерно 10^5 раз.

Ключевые слова:

Трещина автогидроразрыва пласта, полимер-дисперсная система, расход суспензии, зона дренирования пласта, фильтрация.

Введение

Для проведения результативной разработки нефтяного месторождения важно учитывать слоистую неоднородность пласта. В этом случае пласт представляет собой несистемное распределение различных пород, составляющих пропластки, каждый из которых характеризуется собственным набором геолого-физических свойств. Их различие на различных участках пласта очень важно учитывать при использовании в процессе разработки месторождения одного из наиболее применимых на практике методов стимуляции повышения притока нефтяного флюида и увеличения приемистости нагнетательных скважин – метода гидравлического разрыва пласта (ГРП) [1]. Это способствует более эффективному процессу разработки и осуществлению заводнения [2], причём при наличии трещин ГРП работа скважин в дальнейшем происходит при меньших градиентах давления, чем у скважин без этих трещин. Наличие трещин ГРП может быть диагностировано с помощью комбинации данных геологических моделей и сейсморазведки [3] или при использовании геомеханического моделирования [4]. Последние, при использовании также тео-

рии фильтрации и подходов подземной гидромеханики, позволяют определить проводимость трещины и её характеристики [5], а использование регрессионных моделей – и дебит скважин [6].

При использовании метода ГРП для вытеснения коллекторного флюида закачивают воду, которая способствует поддержанию пластового давления и обеспечивает отток нефти к добывающим скважинам. При этом в слоисто-неоднородных пластах для выравнивания фронта вытеснения применяют закачку суспензий, что относится к физико-химическим методам увеличения нефтеотдачи (МУН), которые в настоящее время занимают второе место по частоте использования среди всех МУН. Суспензия преимущественно проникает в области высокой проницаемости. Ввиду несовпадения проницаемости пропластков, а также наличия региональной трещиноватости интенсивная закачка реагента в исследуемый пласт может сопровождаться ранним обводнением пластового флюида [7, 8]. Это является следствием техногенного роста трещин авто-ГРП, поскольку при увеличении объёмов закачки реагента может быть превышена величина расхода суспензии, которую

может принять пласт. В таком случае давление на забое нагнетательной скважины станет больше характерного давления разрушения нефтесодержащей породы, что и приведет к последующему техногенному росту трещины. Такое незапланированное увеличение размеров области высокой проницаемости вызывает появление трещины авто-ГРП, что провоцирует приток воды к добывающим скважинам, сопровождающийся процессом обводнения пластового флюида, а также к излишнему оттоку суспензии в соседние по глубине залегания пропластки. Таким образом, активное развитие этих трещин в пласте приводит к росту обводнённости продукции реагирующих добывающих скважин. Исследования показывают, что продуктивность стимуляции притока нефти к добывающим скважинам в таком случае может снизиться до 50 %. [9]. Данный процесс является неконтролируемым и приводит к уменьшению размеров области, охватываемой заводнением. Для контроля динамики роста трещин проводятся дополнительные исследования по установлению давления увеличения зоны высокой проницаемости [10, 11]. Они способствуют определению оптимальной величины объема закачки, при которой не будет происходить дальнейшего техногенного роста и смыкания трещин авто-ГРП. Эффективные размеры и расположение трещин авто-ГРП, отклик добывающих скважин [12] можно определить в результате гидродинамических исследований скважин по кривым восстановления или падения давления или с помощью моделирования в гидродинамических симуляторах [13]. Для оценки размеров трещины применяется также подход на основе неизо термических моделей, когда рассчитывается изменение температуры жидкости, протекающей по трещине гидроразрыва пласта, из-за эффекта Джоуля–Томсона, причём темп роста температуры меньше для более длинной трещины [14].

Следует отметить, что развитие трещин авто-ГРП может быть более детально изучено при помощи петрофизических исследований кернового материала. Примером может служить сжатие пробы в диаметральной плоскости, то есть бразильский тест [11]. Однако подобные исследования не способны прогнозировать поведение трещины авто-ГРП на достаточно больших расстояниях. Способ моделирования трещин, характеризующихся большими значениями линейных размеров, приводится в работе [15].

Для обеспечения контроля над процессом заводнения используется технология обработки призабойных зон скважин потокоотклоняющими составами [16], заключающаяся в добавлении к закачиваемой жидкости различных композиций реагентов [17], в том числе дисперсных систем [18, 19], причём их объём небольшой, а такая обработка является щадящей. Такие частицы способны блокировать поровые каналы пласта и при этом не отфильтровываться в пласт, а оседать на стенках каналов. Это будет приводить к выравниванию профилей приемистости скважин [20] и снижению вероятности раннего обводнения пластового флюида, то есть обеспечит равномерность вытеснения нефти из пласта. При рассмотрении

подобных моделей вводят приближение линейного оттока реагента в разрабатываемый пласт.

Для предотвращения высокой обводнённости продукции добывающих скважин целесообразно проводить блокирование трещин авто-ГРП. Трещины ГРП, полученные на предыдущих стадиях использования технологии, перед применением следующей стадии гидроразрыва при наличии нежелательной связи с обводнёнными скважинами также могут целенаправленно блокироваться [21].

Моделирование процесса блокирования трещины может быть произведено и для случая применения различных композиций реагентов. Так, пример разработки модели при закачке гелеобразующих составов в трещину ГРП описал в своей работе Рэндалл Серайт [20]. Такая модель позволяет установить время, после которого происходит полное блокирование трещины.

Классические модели по расчёту фильтрации жидкости в трещине ГРП предполагают использование законов сохранения массы и закона сохранения импульса [22], а в случае учёта неизо термических эффектов – и закона сохранения энергии [23]. При рассмотрении как трещины ГРП, так и самого пласта эти модели позволяют рассчитать насыщенность фаз в любой его точке.

Существует также подход к моделированию движения флюида в пласте (в том числе при наличии трещин ГРП и авто-ГРП) на основе машинного обучения [24]. Такой подход, хоть и позволяет обобщить результаты моделирования, полученные по одному пласту, на ряд похожих по фильтрационно-емкостным параметрам, не является достаточно точным при существенном изменении характеристик месторождения. Более того, машинное обучение не позволяет в достаточной степени отследить физику протекающих в пласте процессов.

Для проведения оценки эффективности добавления полимер-дисперсных систем в закачиваемый агент, то есть для определения изменения дебита скважины, необходимо произвести анализ механизмов воздействия частиц на разрабатываемый пласт. Также для увеличения эффективности нефтедобычи, то есть предотвращения процесса раннего обводнения, при использовании метода гидравлического разрыва пласта необходимо знать характерный размер зоны дренирования, чтобы знать область в пласте, где ограничивается влияние от одной скважины. Знание такой области позволяет применять обработки нагнетательных скважин без риска реагирования соседних скважин. Однако на данный момент эти задачи остаются нерешёнными.

В данной работе предложена математическая модель, в которой в качестве средства управления фильтрационными потоками и повышения охвата пласта заводнением применяется полимер-дисперсная система. Примерами могут служить древесная мука или мел [25]. Также она позволяет оценить размеры зоны дренирования пласта, содержащего трещину авто-ГРП, а именно глубину проникновения суспензии в пласт, на которой давление становится равным пластовому. Произведен расчет расстояния до контура

питания с помощью аналитического решения. На основании этих результатов построена математическая модель для прогнозирования воздействия дисперсных частиц закачиваемого агента на пласт и численная оценка изменения расхода суспензии при обработке трещины авто-ГРП полимер-дисперсной смесью.

Математическая модель задачи о расстоянии до контура питания

В основе формирования математической модели для прогнозирования размеров зоны дренирования разрабатываемого пласта лежит ряд упрощений, ка-

сающихся геометрии трещины и рассматриваемых физических процессов, позволяющих построить аналитическое решение. Полагается, что рассматриваемая трещина авто-ГРП плоская и распространяется вдоль оси Ox (рис. 1), тогда ее сечение представляет собой прямоугольник, расположенный в плоскости Oxy . При этом мощность трещины является величиной постоянной по всей длине. Таким образом можно свести задачу о протекании суспензии в трещине авто-ГРП к рассмотрению движения реагента в канале прямоугольного сечения.

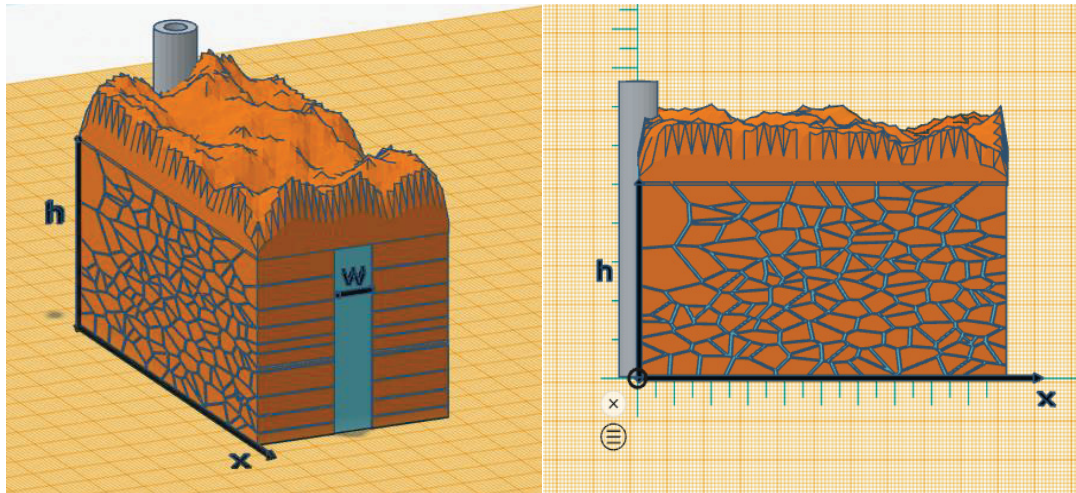


Рис. 1. Модель разрабатываемого пласта с трещиной авто-ГРП

Fig. 1. Model of the developed reservoir with auto-hydraulic fracture

Далее следует сформулировать предположения о характере протекающих физических процессов. Пласт изотропный и состоит из одного пропластка. Вводится допущение о линейности оттока жидкости в пласт, также не будут учитываться различные краевые эффекты в прискважинных зонах. При этом скорость ее фильтрации должна быть достаточно низкой. Выполнение этого условия позволит использовать для описания процесса проникновения суспензии в пласт закон Дарси. Немаловажным является и предположение о поведении частиц полимер-дисперсной смеси. В модели дисперсные частицы в пласт не поступают, а оседают на стенках поровых каналов в трещине. Таким образом, в пласт поступает только жидкость. Построение аналитического решения будет проводиться в приближении односкоростного течения частиц суспензии и жидкости в трещине.

Для дальнейшей математической постановки задачи воспользуемся следующими законами:

Уравнение неразрывности массы в одномерном случае:

- для частиц суспензии:

$$\frac{\partial(hw\alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(hw\alpha u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

- для жидкости:

$$\frac{\partial(hw(1-\alpha))}{\partial t} + \frac{\partial(hw(1-\alpha)u)}{\partial x} = -q. \quad (2)$$

Линейный закон Дарси для оттока жидкости в пласт:

$$q = \frac{kh}{\mu L} (P - P_r). \quad (3)$$

Закон Пуазейля для скорости суспензии, описывающий движение рабочего раствора в канале прямоугольного сечения:

$$u = -\frac{w^2}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (4)$$

где h – мощность пласта; w – ширина трещины; α – концентрация дисперсных частиц; t – время; x – горизонтальная координата; u – скорость фильтрации; q – удельный расход воды из трещины в пласт; k – проницаемость пласта; μ – вязкость флюида; L – характерный линейный размер пласта, на котором устанавливается пластовое давление; P – давление; P_r – пластовое давление.

Если решить систему уравнений (1)–(4) относительно величины P с учётом того, что давление зависит только от горизонтальной координаты x , можно получить обыкновенное неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка:

$$\frac{d^2 P}{dx^2} = \frac{12k}{w^3 L} (P - P_r).$$

Его решение можно представить как сумму общего решения однородного дифференциального уравнения и частного решения неоднородного. В результате можно получить выражение, описывающее распределение давления в пласте P . Однако для однозначного

определения постоянных, возникающих в процессе решения уравнения, необходимо установить несколько граничных условий. Давление в начале отсчета, то есть в области нагнетания суспензии в пласт, будет равным забойному, а на удалении выравнивается с пластовым:

$$P(0, t) = P_w,$$

$$P(l, t) = P_r,$$

где P_w – давление на забое скважины; l – длина трещины. Таким образом, описать распределение давления в пласте можно при помощи следующего выражения:

$$P = \frac{P_w - P_r}{1 - e^{-2\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}l}} A + P_r,$$

где введено обозначение $A = e^{-\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}x} - e^{\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}(x-2l)}$.

Далее из закона Пуазейля для скорости суспензии по найденному значению давления в пласте можно определить u :

$$u = \sqrt{\frac{wk}{12\mu^2L}} \frac{P_w - P_r}{1 - e^{-2\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}l}} B, \quad (5)$$

где введено обозначение $B = \left(e^{-\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}x} + e^{\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}(x-2l)} \right)$.

Для дальнейшего нахождения характерного размера зоны дренирования пласта L необходимо воспользоваться условием баланса между количествами жидкости, притекающим в трещину и отфильтрованным из нее через стенки в пласт:

$$Q_{in} = Q_{out}. \quad (6)$$

Расход жидкости, которая поступает в трещину посредством нагнетания, можно рассчитать следующим образом:

$$Q_{in} = u(0)wh(1 - \alpha_0), \quad (7)$$

где α_0 – концентрация дисперсных частиц в суспензии в скважине. При этом учитывается, что скорость течения суспензии зависит от горизонтальной координаты x , то есть от величины удаления от места ее нагнетания в пласт, а следовательно, для соответствующего расчета необходимо использовать значение скорости именно вблизи нагнетательной скважины, где и происходит закачка. Тогда для расчета концентрации жидкости в данной области важно учитывать долю дисперсных частиц в закачиваемой смеси, что и приводит к введению величины α_0 :

$$\alpha(0, t) = \alpha_0.$$

Расход жидкости из трещины в пласт можно описать выражением, представленным ниже:

$$Q_{out} = 2hw \int_0^l \frac{q}{hw} dx. \quad (8)$$

В выражении (8) учтено, что отток происходит в обе стороны по всей длине трещины. На основании соотношений (1), (2), (5)–(8) можно прийти к квадратному уравнению вида:

$$(\alpha_0 + 1)e^{-2\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}l} - 4e^{-\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}l} + \alpha_0 + 1 = 0. \quad (9)$$

Его решение может быть получено путем введения новой переменной:

$$z = e^{-\sqrt{\frac{12k}{w^3L}}l}.$$

При этом важно заметить, что дискриминант соответствующего уравнения всегда будет величиной положительной

$$D = 16 - 4(\alpha_0 + 1)^2 > 0,$$

а следовательно, в качестве решения уравнения всегда будут получаться только действительные числа.

Тогда из решения выражения (9) имеется два корня, которые будут описывать характерный размер зоны дренирования пласта L :

$$L = \frac{12kl^2}{w^3 \ln^2 \left(\frac{\alpha_0 + 1}{2 \pm \sqrt{4 - (\alpha_0 + 1)^2}} \right)}. \quad (10)$$

Следует обратить внимание, что согласно уравнению (10) для характерного размера зоны дренирования пласта L при любых значениях параметров рассматриваемого пропластка будет справедливо:

$$L \geq 0.$$

Необходимо провести анализ полученного выражения (10). Рассматриваются два предельных случая:

1. Предполагается, что концентрация частиц суспензии в смеси в нагнетательной скважине равна нулю:

$$\alpha_0 = 0.$$

В таком случае процесс заводнения происходит без воздействия дисперсных частиц на пласт, то есть в закачиваемую жидкость не добавлены какие-либо полимер-дисперсные системы. При этом w – ширина трещины, α_0 – концентрация дисперсных частиц в суспензии в скважине, k – проницаемость пласта и l – длина трещины являются положительными величинами, постоянными для рассматриваемого образца. Поскольку корни, описываемые выражением (10), отличаются лишь знаком в аргументе логарифма, то рассмотрение возможных значений характерного размера зоны дренирования пласта L может быть сведено к анализу значений, которые может принимать квадрат логарифма:

$$\ln^2 \left(\frac{\alpha_0 + 1}{2 \pm \sqrt{4 - (\alpha_0 + 1)^2}} \right) = \ln^2 \left(\frac{1}{2 \pm \sqrt{3}} \right).$$

Можно заметить, что в данном случае значения квадрата логарифма для обоих корней будут практически совпадающими, а следовательно, и сами корни будут совпадать с высокой точностью.

2. Берётся в рассмотрение случай, когда в трещину будут нагнетаться только дисперсные частицы, то есть значение концентрации частиц суспензии в смеси в нагнетательной скважине будет равным единице:

$$\alpha_0 = 1.$$

Рассуждая аналогично предыдущему случаю, исследуем значения, принимаемые квадратом логарифма:

$$\ln^2 \left(\frac{\alpha_0 + 1}{2 \pm \sqrt{4 - (\alpha_0 + 1)^2}} \right) = \ln^2 1.$$

Как видно из соотношения выше, выражения, стоящие под знаком логарифма, будут одинаковы для обоих корней, а следовательно, и сами корни совпадут. Можно рассмотреть предел:

$$\lim_{\alpha_0 \rightarrow 1} L = \lim_{\alpha_0 \rightarrow 1} \frac{12kl^2}{w^3 \ln^2 \left(\frac{\alpha_0 + 1}{2 \pm \sqrt{4 - (\alpha_0 + 1)^2}} \right)}.$$

Таким образом

$$\lim_{\alpha_0 \rightarrow 1} L = \lim_{\alpha_0 \rightarrow 1} \frac{12kl^2}{0}.$$

Необходимо отметить, что рассматриваемый предельный случай соответствует бесконечному возрастанию характерного размера зоны дренирования.

Определение размеров зоны дренирования

Следует провести численный расчет для величины L . В качестве исходных параметров разрабатываемого пласта берутся следующие значения:

$$\begin{aligned} k &= 10^{-13} \text{ Д}; \\ l &= 200 \text{ м}; \\ w &= 2 \times 10^{-3} \text{ м}; \\ \alpha_0 &= 0,03. \end{aligned} \quad (11)$$

Тогда при подстановке численных значений (11) в выражение (10) можно получить:

$$L \approx 3,65 \text{ м}. \quad (12)$$

Результаты расчетов и проведенный выше анализ значений, которые может принимать величина L , дают понять, что при любых значениях параметров разрабатываемого пласта корни практически совпадают, а следовательно, характер получаемого решения (12) не будет зависеть от выбора знака.

Математическая модель задачи о механизмах воздействия частиц на пласт

При построении математической модели для прогнозирования воздействия дисперсных частиц на пласт с трещиной авто-ГРП, а именно, изменения расхода суспензии при обработке области высокой проницаемости полимер-дисперсной смесью, к рассмотрению будет приниматься случай одного из высокопроницаемых пропластков многослойного пласта, характеризующегося собственными мощностью $-h$, шириной трещины $-w$, горизонтальной координатой $-x$, проницаемостью $-k$ и характерным линейным размером $-L$, на котором устанавливается пластовое давление.

Аналогично математической модели для прогнозирования размеров зоны дренирования разрабатываемого пласта принимается ряд упрощений, касающихся геометрии трещины и пропластка, а также рассматриваемых физических процессов, позволяющих построить необходимое аналитическое решение, используя ранее сформированную модель для определения расстояния до контура питания. Как и ранее вводится допущение о форме рассматриваемой трещины авто-ГРП. Полагается, что она плоская и распространяется вдоль оси Ox (рис. 2), вследствие чего ее сечение представляет собой прямоугольник, расположенный в плоскости Oxy . При этом мощности трещины и пропластка совпадают и являются величинами постоянными по всей длине. Эти аспекты, аналогично математической модели, рассмотренной ранее, позволяют свести задачу о протекании суспензии в трещине авто-ГРП в пропластке к рассмотрению движения рабочего раствора в канале прямоугольного сечения.

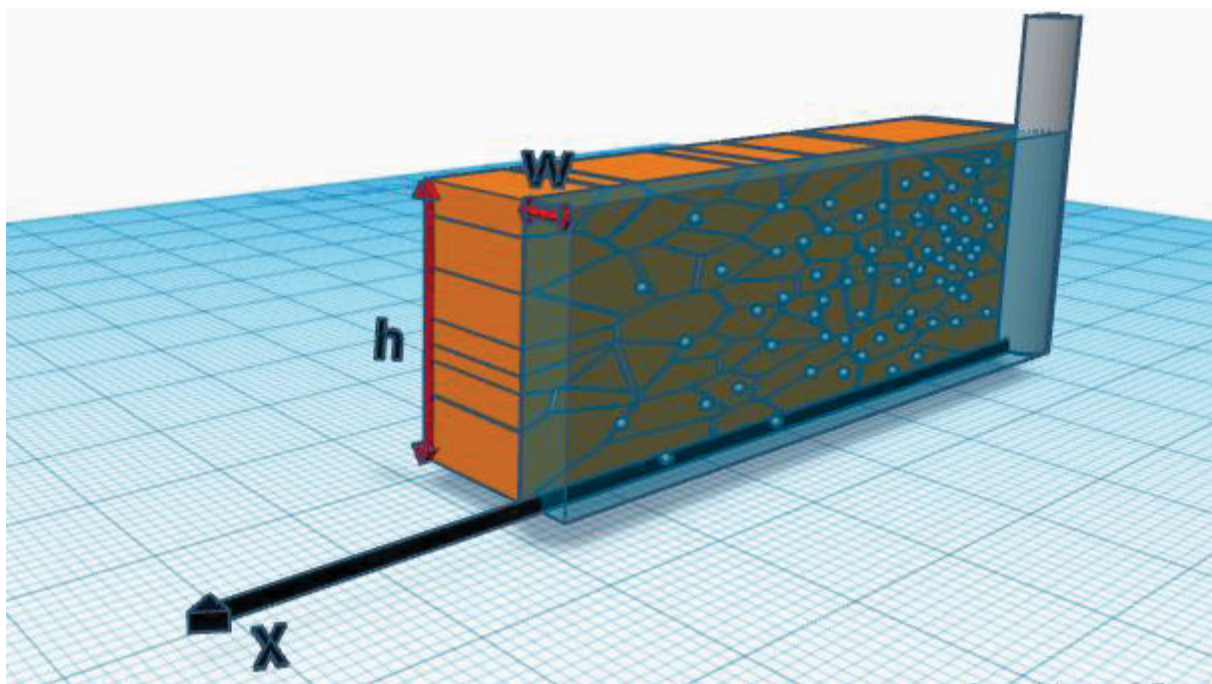


Рис. 2. Модель разрабатываемого пласта

Fig. 2. Model of the developed reservoir

Далее формулируются предположения о характере протекающих физических процессов. Принимается к рассмотрению случай, когда отток жидкости в пласт и течение в призабойной зоне являются линейными, в то же время они перпендикулярны плоскости трещины, также не будут учитываться различные краевые эффекты в прискважинных зонах. Допущения, касающиеся скорости фильтрации и поведения частиц полимер-дисперсной смеси, будут такими же, как и при рассмотрении зоны дренирования разрабатываемого пласта. Однако при исследовании движения суспензии в поровом пространстве также важно принять во внимание процесс осаждения частиц. Он будет приводить к постепенному снижению проницаемости рассматриваемого пропластка. Для учета этого процесса вводят дополнительные параметры: σ – объемное содержание захваченных в пористой среде частиц в единице объема породы и β – коэффициент загрязнения. Таким образом, проницаемость разрабатываемого пласта при обработке трещины авто-ГРП полимер-дисперсной смесью будет определяться как:

$$k^* = \frac{k}{\int_0^L (1 + \sigma \beta) dx}. \quad (13)$$

Дальнейшие рассуждения будут проводиться с использованием следующих уравнений:

- Закон Дарси для скорости фильтрации жидкости в одномерном случае в пропластке при наличии дисперсных частиц:

$$U = \frac{k^*}{\mu l} (P - P_r). \quad (14)$$

- Уравнение неразрывности для частиц, входящих в состав суспензии, с учетом возможного осаждения частиц в поровом пространстве для одномерного случая:

$$\frac{\partial(\rho(m\alpha + \sigma))}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U \alpha)}{\partial x} = 0. \quad (15)$$

- Поток дисперсионных частиц:

$$J = \frac{\partial \sigma}{\partial t}, \quad (16)$$

$$J = \lambda \alpha U, \quad (17)$$

где α – объемное содержание частиц в потоке; λ – коэффициент фильтрации, подобранный эмпирически путем; m – пористость; U – скорость фильтрации при учете процесса осаждения частиц; ρ – плотность жидкости, заполняющей поровое пространство.

Важно понимать, что проницаемость пропластка будет снижаться ввиду частичного блокирования поровых каналов, также будет изменяться и забойное давление.

Расход нагнетаемой в пропласток смеси перед введением дисперсных частиц:

$$Q_0 = \frac{2khl}{\mu l} \Delta P. \quad (18)$$

Расход суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью:

$$Q_1 = \frac{2k^*hl}{\mu l} \Delta P_1, \quad (19)$$

где ΔP и ΔP_1 – разность между забойным и пластовым давлениями до и после введения полимер-

дисперсной системы, соответственно, вычисляемые как

$$\Delta P = P_w - P_r, \quad (20)$$

$$\Delta P_1 = P_{w1} - P_r.$$

Здесь P_{w1} – некоторое установившееся давление вблизи нагнетательной скважины при закачке суспензии. Из выражений (13) и (19) можем получить:

$$Q_1 = \frac{2khl}{\mu l \int_0^L (1 + \sigma \beta) dx} \Delta P_1. \quad (21)$$

Необходимо найти выражение для объемного содержания захваченных в пористой среде частиц в единице объема породы σ . Для этого следует решить систему из уравнений (16) и (17):

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \lambda \alpha U. \quad (22)$$

Для однозначного определения константы, появляющейся в процессе решения уравнения (22), следует установить начальное условие. Будет полагаться, что в начальный момент времени дисперсных частиц суспензии в пласте нет:

$$\sigma(t = 0) = 0. \quad (23)$$

Для построения дальнейшего решения можно перейти к безразмерным величинам. Это необходимо для обеспечения удобства сравнения различных случаев фильтрации:

$$\Lambda = \lambda L, \quad (24)$$

$$T = \frac{t}{t_0}, \quad (25)$$

где t_0 – некоторое характерное время. Для удобства построения дальнейшего решения t_0 задаётся как:

$$t_0 = \frac{mL}{U}. \quad (26)$$

Важно отметить, что для начального момента времени будет справедливо:

$$T(t = 0) = 0. \quad (27)$$

В таком случае, учитывая соотношения (24)–(26), выражение (22) может быть преобразовано к виду:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial T} = \Lambda \alpha m. \quad (28)$$

Последующее решение (28) будет построено с учетом начальных условий (23) и (27). Это позволяет получить уравнение, описывающее объемное содержание захваченных в пористой среде частиц в единице объема породы:

$$\sigma = \Lambda \alpha m T. \quad (29)$$

Для проведения дальнейших преобразований необходимо исследовать вид выражения, определяющего объемное содержание частиц в потоке α . Сделаем допущение о несжимаемости закачиваемой жидкости:

$$\rho = \text{const.}$$

В то же время будет полагаться, что скорость фильтрации жидкости и пористость будут постоянны вдоль всей трещины авто-ГРП:

$$U = \text{const.}$$

$$m = \text{const.}$$

Тогда уравнение (15) может быть приведено к виду:

$$\frac{\partial(m\alpha + \sigma)}{\partial t} + U \frac{\partial \alpha}{\partial x} = 0. \quad (30)$$

Путем подстановки выражений (16), (17) в (30) можно получить:

$$m \frac{\partial \alpha}{\partial t} + U \frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\lambda \alpha U. \quad (31)$$

Введем еще одну безразмерную величину:

$$X = \frac{x}{L}. \quad (32)$$

С учётом соотношений (24)–(26) и (32) уравнение (31) приводится к виду:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial T} + \frac{\partial \alpha}{\partial X} = -\Lambda \alpha.$$

Таким образом, получено дифференциальное уравнение в частных производных первого порядка. Его решение может быть найдено методом характеристик. Для однозначного определения постоянных, возникающих в процессе решения уравнения, необходимо установить граничное условие для объемного содержания частиц вблизи нагнетательной скважины:

$$\alpha(0, t) = \alpha_0. \quad (33)$$

Далее составляются уравнения характеристик и решается обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка вида:

$$\frac{d\alpha}{dS} = -\Lambda \alpha, \quad (34)$$

где S – характеристическая координата. Решением уравнения (34) с учетом граничного условия (33) является выражение, описывающее изменение объемного содержания частиц в потоке вдоль трещины авто-ГРП:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\Lambda X}.$$

Для дальнейшего исследования изменения расхода суспензии при обработке трещины авто-ГРП полимер-дисперсной смесью необходимо воспользоваться уравнениями для расхода нагнетаемой в пласт рабочей смеси. При использовании выражений (33) и (29) можно определить объемное содержание захваченных в пористой среде частиц в единице объема породы σ :

$$\sigma = \alpha_0 \Lambda m T e^{-\Lambda X}. \quad (35)$$

Данное выражение позволяет определить расход суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью. Если принять во внимание соотношения (21), (24)–(26) и (32), то можно получить:

$$Q_1 = \frac{2khl(P_{w1} - P_r)}{\mu L \int_0^L (1 + \alpha_0 \lambda U t e^{-\lambda x} \beta) dx}.$$

С учетом выражения (35), уравнения для проницаемости разрабатываемого пласта при обработке трещины авто-ГРП полимер-дисперсной смесью (13) и закона Дарси (14) для нахождения расхода суспензии после обработки может быть составлена система уравнений:

$$Q_1 = \frac{2hl^2 U (P_{w1} - P_r)}{L (P - P_r)}, \quad (36)$$

$$U = \frac{k(P - P_r)}{\mu L \int_0^L (1 + \alpha_0 \lambda U t e^{-\lambda x} \beta) dx}. \quad (37)$$

Она определяет величину расхода суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью.

Определение изменения расхода суспензии

Следует провести численную оценку изменения расхода суспензии при обработке трещины авто-ГРП полимер-дисперсной смесью. В качестве исходных параметров разрабатываемого пласта берутся значения (11) и рассчитанный ранее характерный линейный размер зоны дренирования пласта (12). Также установим:

$$\begin{aligned} h &= 30 \text{ м}, \\ \beta &= 400, \\ t &= 86400 \text{ с}, \\ \lambda &= 10 \text{ м}^{-1}, \\ \mu &= 8 \text{ мПа} \cdot \text{с}. \end{aligned} \quad (38)$$

Пусть забойные давления, то есть давления в области нагнетания рабочего агента в пласт до и после введения полимер-дисперсной смеси, будут одинаковыми для удобства сравнения:

$$\begin{aligned} P_w &= 3,5 \times 10^7 \text{ Па}, \\ P_{w1} &= 3,5 \times 10^7 \text{ Па}. \end{aligned}$$

Пластовое давление также будет одинаковым для обоих случаев:

$$P_r = 2,5 \times 10^7 \text{ Па}. \quad (39)$$

Тогда из выражения (18), если принять во внимание соотношение (20), может быть рассчитан расход нагнетаемой в пропласток смеси перед введением дисперсных частиц:

$$Q_0 \approx 0,41 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (40)$$

Для расчета расхода суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью необходимо решить систему уравнений (36), (37). При этом применимы численные методы.

Решение трансцендентного уравнения (37) было найдено при использовании метода простой итерации с относительной ошибкой порядка 10^{-2} . Также учитывалось, что коэффициент загрязнения β не является функцией от горизонтальной координаты x . При подстановке численных значений (11), (12) и (38), (39) в выражение (36) был определен расход суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью:

$$Q_1 = 4 \times 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (41)$$

Анализ полученных значений (40) и (41) позволяет сделать вывод о снижении расхода суспензии при обработке области высокой проницаемости полимер-дисперсной смесью.

Заключение

Анализ разработанной математической модели, позволяющей определить характерный размер зоны дренирования пласта, позволяет сделать вывод о прогнозируемом увеличении размеров контура питания при повышении концентрации дисперсных частиц в нагнетаемой суспензии. Это является следствием того,

что при увеличении количества частиц в закачиваемом агенте концентрация жидкости будет снижаться. Из выражения (7) для расхода жидкости при нагнетании в трещину можно заметить, что подобное изменение приведет к снижению количества закачиваемой воды. Тогда при выполнении условия баланса между количеством жидкости, притекающей в трещину и отфильтрованным из нее через стенки в пласт (6), отток воды также снизится. Поскольку изменения давления при этом не происходит, то процесс снижения расходов может быть связан лишь с соответствующим увеличением размеров зоны дренирования пласта L . Также важно обратить внимание на зависимость величины L от характерных размеров трещины авто-ГРП.

Еще одним немаловажным следствием полученного аналитического решения (10) является ожидаемое увеличение расстояния до контура питания при возрастании линейного размера трещины. Таким образом, увеличение области высокой проницаемости

приводит к соответствующему росту зоны дренирования пласта.

Сформулированная математическая модель для оценки воздействия дисперсных частиц на пласт с трещиной авто-ГРП прогнозирует снижение расхода суспензии в пласт ввиду блокирования части поровых каналов дисперсными частицами, входящими в состав реагента. Данная модель применима для оценки эффективности добавления полимер-дисперсных систем в закачиваемую суспензию, то есть для определения изменения дебита скважины. Это важно для осуществления контроля процесса заводнения коллектора при использовании метода гидравлического разрыва пласта для стимуляции повышения притока нефтяного флюида и увеличения приемистости нагнетательных скважин.

Также важно обратить внимание на зависимость величины расхода суспензии после обработки скважины полимер-дисперсной смесью от горизонтальной координаты. С ростом координаты x расход будет увеличиваться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Griffiths J.D., Lepper U. Ultimate recoveries and economics of massive hydraulically fractured wells in the Hauptsand, Soehlingen gas field, Germany // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 19792. – 1989. – P. 227–238. URL: <http://doi.org/10.2118/19792-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
2. Practical compartmental model for shale-gas production by multiple-fractured horizontal wells considering transport influenced by nano-pore proximity / B. Milad, F. Civan, D. Devegowda, R.F. Sigal // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-169011-MS. – 2014. – P. 1–26. URL: <http://doi.org/10.2118/169011-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
3. Han Z., Ren G., Younis R.M. Unified reservoir and seismic simulation with explicit representation of fractures and faults // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203979-MS. – 2021. URL: <http://doi.org/10.2118/203979-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
4. Использование имитационных геолого-петрофизических моделей для снижения рисков при бурении при освоении шельфовых месторождений / Н.В. Дубиня, А.В. Вершинин, А.С. Пирогова, С.А. Тихоцкий // Society of Petroleum Engineers. Статья с конференции SPE-201978-RU. – 2020. – С. 1–21. URL: <https://doi.org/10.2118/201978-RU> (дата обращения: 02.07.2022).
5. Model for estimating optimum hydraulic fracture geometry in gas condensate reservoir / J.E. Odo, P.M. Ikpeka, N.U. Okereke, B.C. Odo, U.U. Idika, D.C. Ofoegbu // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203653-MS. – 2020. – P. 1–14. URL: <http://doi.org/10.2118/203653-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
6. Галкин В.И., Колтырин А.Н. Исследование и анализ методов определения эффективности применения технологии пропантного гидроразрыва пласта // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 50–58.
7. Выбор оптимальной системы разработки для месторождений с низкопроницаемыми коллекторами / В.А. Байков, Р.М. Жданов, Т.И. Муллағалиев, Т.С. Усманов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – № 1. – С. 84–100. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_2.pdf (дата обращения: 02.07.2022).
8. Изотов А.А., Афонин Д.Г. О взаимосвязи факторов, влияющих на эффективность разработки низкопроницаемых коллекторов с применением заводнения // Нефтяное хозяйство. – 2020. – № 12. – С. 106–109.
9. Давлетова А.Р., Федоров А.И., Щутский Г.А. Анализ риска самопроизвольного роста трещины гидроразрыва пласта в вертикальном направлении // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 6. – С. 50–53.
10. Singh P., Agarwal R.G. Two-step rate test: new procedure for determining formation parting pressure // Journal of Petroleum Technology. – 1990. – V. 42. – № 1. – P. 84–90. URL: <https://doi.org/10.2118/18141-PA> (дата обращения: 02.07.2022).
11. Cheng C., Milsch H. Hydromechanical investigations on the self-propping potential of fractures in tight sandstones // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2021. – V. 54. – P. 5407–5432. URL: <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02500-4> (дата обращения: 02.07.2022).
12. Wijesinghe A.M., Kececioglu I. Analysis of interference pressure tests in naturally fractured reservoirs with macroscopic fracture and pore system permeabilities and unsteady interporosity flow // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 14522. – 1985. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.2118/14522-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
13. Liu C.-H., Nakajima K., King M.J. Application of novel stabilized zone simulation and flow diagnostics for the interpretation of the SRV and assessment of multiwell interference // Society of Petroleum Engineers. Conference paper URTEC-208354-MS. – 2021. URL: <https://doi.org/10.15530/AP-URTEC-2021-208354> (дата обращения: 02.07.2022).
14. Исследование температурных полей в пластах с трещиной гидроразрыва / Р. Валиуллин, А. Рамазанов, Р. Шарафутдинов, А. Шарипов, И. Низаева, К. Бадетз, В. Жафрезик // Society of Petroleum Engineers. Статья с конференции SPE-187748-RU. – 2017. – С. 1–20. URL: <https://doi.org/10.2118/187748-RU> (дата обращения: 02.07.2022).
15. Промысловые исследования по изучению самопроизвольного развития техногенных трещин в нагнетательных скважинах / А.Я. Давлетбаев, В.А. Байков, Г.Р. Бикбулатова, Р.Н. Асмандияров, Э.Р. Назаргалин, А.А. Слабешкин, А.В. Сергейчев, Р.И. Нуриев // Society of Petroleum Engineers. Статья с конференции SPE-171232-RU. – 2014. – С. 1–9. URL: <https://doi.org/10.2118/171232-RU> (дата обращения: 02.07.2022).
16. Ручкин А.А., Ягафаров А.К. Оптимизация применения потокоотклоняющих технологий на Самотлорском месторождении. – Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2005. – 165 с.
17. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1996. – V. 15. – № 1. – P. 69–80. URL: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5) (дата обращения: 02.07.2022).
18. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection / K.M. Fedorov, A.Ya. Gilmanov, A.P. Shevelev, A.V. Kobayashv, D.A. Anuriev // Mathematics. – 2021. – V. 9. – № 15. – P. 1727–1741. URL: <https://doi.org/10.3390/math9151727> (дата обращения: 02.07.2022).
19. Выдыш И.В., Федоров К.М., Анурьев Д.А. Сопоставление эффективности полимер-дисперсных обработок нагнетательных скважин различной конструкции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое мо-

- делирование. Нефть, газ, энергетика. – 2022. – Т. 8. – № 1 (29). – С. 58–74. URL: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-58-74> (дата обращения: 02.07.2022).
20. Seright R. Gel propagation through fractures // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 59316. – 2000. – P. 1–9. URL: <http://doi.org/10.2118/59316-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
21. Naizhen L., Ming L. Application of temporary-blocking fracturing technology in casing-deformed shale gas well // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-190982-MS. – 2018. – P. 1–8. URL: <http://doi.org/10.2118/190982-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
22. Impact of accurate fractured reservoir flow modeling on recovery predictions / G. Singh, G. Pencheva, K. Kumar, T. Wick, B. Ganis, M.F. Wheeler // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 168630. – 2014. – P. 1–10. URL: <http://doi.org/10.2118/168630-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
23. Трёхмерное численное моделирование динамики давления и температуры в скважине с трещиной ГРП / Ю.А. Питюк, А.Я. Давлетбаев, А.А. Мусин, Д.Ф. Марьин, Е.В. Сельтикова, И.А. Зарафутдинов, Л.А. Ковалева, Г.А. Фурсов, Э.Р. Назаргалин, Д.А. Мустафин // Society of Petroleum Engineers. Статья с конференции SPE-181971-RU. – 2016. – С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.2118/181971-RU> (дата обращения: 02.07.2022).
24. Sambo C., Feng Y. Physics inspired machine learning for solving fluid flow in porous media: a novel computational algorithm for reservoir simulation // Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203917-MS. – 2021. URL: <http://doi.org/10.2118/203917-MS> (дата обращения: 02.07.2022).
25. Газизов А.Ш., Низамов Р.Х. Оценка эффективности технологии применения полимер-дисперсной системы по результатам промысловых исследований // Нефтяное хозяйство. – 1990. – № 7. – С. 49–52.

Поступила 19.07.2022 г.

Прошла рецензирование 13.10.2022 г.

Информация об авторах

Шевелёв А.П., кандидат физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета.

Гильманов А.Я., кандидат физико-математических наук, инженер 2 категории кафедры моделирования физических процессов и систем Физико-технического института Тюменского государственного университета.

Канонирова Е.П., студент Физико-технического института Тюменского государственного университета.

UDC 532.5-1/-9

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS FOR PREDICTING THE CHARACTERISTIC LINEAR DIMENSIONS OF THE FORMATION DRAINAGE ZONE AND THE IMPACT OF DISPERSED PARTICLES ON THE FORMATION WITH AUTO-HYDRAULIC FRACTURE

Alexander P. Shevelev¹,
a.p.shevelev@utmn.ru

Alexander Ya. Gilmanov¹,
a.y.gilmanov@utmn.ru

Elizaveta P. Kanonirova¹,
stud0000123797@study.utmn.ru

¹ University of Tyumen,
15A, Perekopskaya street, Tyumen, 625003, Russia.

The relevance of the research is in the need to prevent early growth of the production water cut during the development of oil reservoirs characterized by low permeability because of increase in the number of oil production operations using hydraulic fracturing technology.

The main goal is to develop mathematical models for predicting the characteristic linear dimensions of the reservoir drainage zone and the impact of dispersed particles on the formation with auto-hydraulic fracture.

The main objects: reservoirs with low permeability, auto-hydraulic fracture, suspension injected into an oil reservoir, dispersed particles added to the working agent.

Applied methods: statement of the physical problem, compiling a system of equations of mechanics of multiphase systems, simple iteration method for solving a transcendental equation, evaluation and analysis of the values predicted by the developed models.

Research results. It was established that the mathematical model developed on the basis of the system of equations of mechanics of multiphase systems makes it possible to determine the characteristic linear size of the formation drainage zone. It is shown that for the presented model parameters, this characteristic is 3,65 m. It is determined that the control parameters for the linear size of the drainage zone are the concentration of suspension particles in the mixture in the injection well, the formation permeability, the width and length of the fracture. A mathematical model was built to predict the impact of dispersed particles of the injected agent on the formation. It was found that when dispersed particles are added to the working mixture, the suspension consumption decreases due to the deposition of particles in the pore channels. A numerical evaluation of the change in the flow rate of the suspension during the treatment of a crack with an auto-fracturing polymer-dispersed mixture was carried out. For the presented model parameters, the decrease in the flow rate is approximately 10^5 times.

Key words:

Auto-hydraulic fracture, polymer-dispersed system, suspension flow rate, formation drainage zone, filtration.

REFERENCES

- Griffiths J.D., Lepper U. Ultimate recoveries and economics of massive hydraulically fractured wells in the Hauptsand, Soehlingen gas field, Germany. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 19792*, 1989. pp. 227–238. Available at: <http://doi.org/10.2118/19792-MS> (accessed: 2 July 2022).
- Milad B., Civan F., Devegowa D., Sigal R.F. Practical compartmental model for shale-gas production by multiple-fractured horizontal wells considering transport influenced by nano-pore proximity. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-169011-MS*, 2014. pp. 1–26. Available at: <http://doi.org/10.2118/169011-MS> (accessed: 2 July 2022).
- Han Z., Ren G., Younis R.M. Unified reservoir and seismic simulation with explicit representation of fractures and faults. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203979-MS*, 2021. Available at: <http://doi.org/10.2118/203979-MS> (accessed: 2 July 2022).
- Dubinya N.V., Vershinin A.V., Pirogova A.S., Tikhotsky S.A. Usage of imitational geological-petrophysical models to reduce drilling risks for offshore reservoirs exploration. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-201978-MS*, 2020. pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.2118/201978-MS> (accessed: 2 July 2022).
- Odo J.E., Ikpeka P.M., Okereke N.U., Odo B.C., Idika U.U., Ofogebu D.C. Model for estimating optimum hydraulic fracture geometry in gas condensate reservoir. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203653-MS*, 2020. pp. 1–14. Available at: <http://doi.org/10.2118/203653-MS> (accessed: 2 July 2022).
- Galkin V.I., Koltirin A.N. Research and analysis of methods for determining the efficiency of application of the proppant hydraulic fracturing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 50–58. In Rus.
- Baikov V.A., Zhdanov R.M., Mullagaliev T.I., Usmanov T.S. Vybor optimalnoy sistemy razrabotki dlya mestorozhdeniy s nizkopronitsaemymi kollektorami [Choosing the optimal development system for fields with low-permeability reservoirs]. *Electronic scientific journal «Oil and Gas Business»*, 2011, no. 1. pp. 84–100. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Baikov/Baikov_2.pdf (accessed: 2 July 2022).
- Izotov A.A., Afonin D.G. The collection of factors affecting the efficiency of low-permeable reservoirs development using flooding. *Neftyanoe khozyaystvo. Oil Industry*, 2020, no. 12, pp. 106–109. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-12-106-109> (accessed: 2 July 2022).
- Davletova A.R., Fedorov A.I., Shchutsky G.A. Risk analysis of spontaneous growth of a hydraulic fracture in the vertical direction. *Neftyanoe Khozyaystvo*, 2019, no. 6, pp. 50–53. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-6-50-53> (accessed: 2 July 2022).
- Singh P., Agarwal R.G. Two-step rate test: new procedure for determining formation parting pressure. *J. Pet. Technol.*, 1990, vol. 42, no. 1, pp. 84–90. Available at: <https://doi.org/10.2118/18141-PA> (accessed: 2 July 2022).
- Cheng C., Milsch H. Hydromechanical investigations on the self-propping potential of fractures in tight sandstones. *Rock Mech. Rock Eng.*, 2021, vol. 54, pp. 5407–5432. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02500-4> (accessed: 2 July 2022).
- Wijesinghe A.M., Kececioğlu I. Analysis of interference pressure tests in naturally fractured reservoirs with macroscopic fracture

- and pore system permeabilities and unsteady interporosity flow. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 14522*, 1985. pp. 1–14. Available at: <http://doi.org/10.2118/14522-MS> (accessed: 2 July 2022).
13. Liu C.-H., Nakajima K., King M.J. Application of novel stabilized zone simulation and flow diagnostics for the interpretation of the SRV and assessment of multiwell interference. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper URTEC-208354-MS*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.15530/AP-URTEC-2021-208354> (accessed: 2 July 2022).
 14. Valiullin R., Ramazanov A., Sharafutdinov R., Sharipov A., Nizaeva I., Badetz K., Zhafrezik V. Investigation of temperature fields in the formations by hydraulic fracture. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-187748-MS*, 2017. pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.2118/187748-MS> (accessed: 2 July 2022).
 15. Davletbaev A.Ya., Baikov V.A., Bikbulatova G.R., Asmandiyarov R.N., Nazargalin E.R., Slabetsky A.A., Sergeychev A.V., Nuriev R.I. Field studies of spontaneous growth of induced fractures in injection wells. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-171232-MS*, 2014. pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.2118/171232-MS> (accessed: 2 July 2022).
 16. Ruchkin A.A., Yagafarov A.K. *Optimizatsiya primeneniya potokootklonyayushchikh tekhnologiy na Samotlorskom mestorozhdenii* [Optimization of the use of flow diverting technologies at the Samotlor field]. Tyumen, Vector Buk Publ. house, 2005. 165 p.
 17. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, vol. 15, no. 1, pp. 69–80. Available at: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5) (accessed: 2 July 2022).
 18. Fedorov K.M., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P., Kobayashv A.V., Anuriev D.A. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 15, pp. 1727–1741. Available at: <https://doi.org/10.3390/math9151727> (accessed: 2 July 2022).
 19. Vydish I.V., Fedorov K.M., Anuriev D.A. Comparison of the suspension stabilized by polymer treatment efficiency for injection wells of various completions. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2022, vol. 8, no. 1 (29), pp. 58–74. Available at: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-58-74> (accessed: 2 July 2022).
 20. Seright R. Gel propagation through fractures. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 59316*, 2000. pp. 1–9. Available at: <http://doi.org/10.2118/59316-MS> (accessed: 2 July 2022).
 21. Naizhen L., Ming L. Application of temporary-blocking fracturing technology in casing-deformed shale gas well. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-190982-MS*, 2018. pp. 1–8. Available at: <http://doi.org/10.2118/190982-MS> (accessed: 2 July 2022).
 22. Singh G., Pencheva G., Kumar K., Wick T., Ganis B., Wheeler M.F. Impact of accurate fractured reservoir flow modeling on recovery predictions. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE 168630*, 2014. pp. 1–10. Available at: <http://doi.org/10.2118/168630-MS> (accessed: 2 July 2022).
 23. Pityuk Yu.A., Davletbaev A.Ya., Musin A.A., Maryin D.F., Seltikova E.V., Zarafutdinov I.A., Kovaleva L.A., Nazargalin E.R., Mustafin D.A. 3D numerical simulation of pressure/temperature dynamics in well with fracture. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-181971-MS*, 2016. pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.2118/181971-MS> (accessed: 2 July 2022).
 24. Sambo C., Feng Y. Physics inspired machine learning for solving fluid flow in porous media: a novel computational algorithm for reservoir simulation. *Society of Petroleum Engineers. Conference paper SPE-203917-MS*, 2021. Available at: <http://doi.org/10.2118/203917-MS> (accessed: 2 July 2022).
 25. Gazizov A.Sh., Nizamov R.Kh. Evaluation of the effectiveness of the technology for the use of a polymer-dispersed system based on the results of field studies. *Neftyanoe Khozyaistvo*, 1990, no. 7, pp. 49–52. In Rus.

Received: 19 July 2022.

Reviewed: 13 October 2022.

Information about the authors

Alexander P. Shevelev, Cand. Sc., professor, University of Tyumen.

Alexander Ya. Gilmanov, Cand. Sc., engineer of the second category, University of Tyumen.

Elizaveta P. Kanonirova, student, University of Tyumen.