

# Геология нефти и газа

УДК 681.518:622.276

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ PWRI-FRAC ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИНЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ И ПОГЛОЩАЮЩИХ СКВАЖИНАХ ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ЗАКАЧКИ ВЫШЕ ДАВЛЕНИЯ ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

Н.А. Жидкова\*, А.А. Захарова

\*Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд., г. Южно-Сахалинск  
Томский политехнический университет  
E-mail: alen@cc.tpu.edu.ru

*Рассматриваются проблемы моделирования процесса трещинообразования при проведении гидравлического разрыва пласта в нагнетательные и поглощающие скважины. С использованием программного продукта PWRI-FRAC, который является частью интегрированной системы Petroleum Expert, проведено моделирование развития трещины для нагнетательных и поглощающих скважин при давлении закачки выше давления гидроразрыва пласта, даны прогнозные параметры трещины и оценены возможные последствия.*

### **Ключевые слова:**

*Гидравлический разрыв пласта, методы интенсификации нефтегазодобычи, моделирование, алгоритмы.*

Современное состояние сырьевой базы нефтяной промышленности характеризуется изменением структуры и качества запасов как на разрабатываемых, так и на вновь открываемых месторождениях. Все большее число месторождений вступает в позднюю и завершающую стадию разработки, характеризующуюся значительным снижением добычи нефти [1]. В этих условиях особую актуальность приобретают проблемы повышения эффективности разработки месторождений. Основным методом поддержания пластового давления и увеличения коэффициента нефтеизвлечения в настоящее время остается заводнение. В соответствии с проектами разработки и рапортами технических служб осуществляется матричное заводнение, однако при ближайшем рассмотрении видно, что рабочее давление скважины выше давления трещинообразования. Образующая трещина не принимается во внимание, соответственно не учитывается ее развитие в вышележащие и нижележащие пласты.

Несмотря на многочисленные попытки создать модель, позволяющую прогнозировать степень повреждения пласта, вызванного закачкой попутной пластовой воды, содержащей углеводороды и твердые примеси, на сегодняшний день такой модели не существует. Поэтому в предложенной и реализованной в рамках программного комплекса Petroleum Expert (компания PETEX) модели PWRI-FRAC использована простейшая модель поврежде-

ния пласта, включающая ряд параметров, которые можно адаптировать по результатам промысловых испытаний.

Основными задачами программного продукта PWRI-FRAC являются: оценка распространения трещины в результате закачки по вертикали и горизонтали (как для закачки чистой воды, так и пластовой), распространение трещины по вертикали в случае неограниченной зоны нагнетания, оценка проницаемости, формы и распространения зоны заводнения. В математической модели PWRI, которая реализована в рамках предлагаемого программного продукта, распространение трещины определяется следующими физическими процессами (рис. 1).

1. Поток закачиваемого флюида происходит в направлении вершины трещины и вызывает внутри трещины потерю давления на трение ( $\delta_{p, \text{fric}}$ ). Когда предполагается ламинарный поток, градиент потери давления  $p$  на трение соотносится с шириной трещины следующим образом:

$$\frac{\partial p}{\partial r} \propto \frac{\mu Q}{[w(r)]^3},$$

где  $w(r)$  – «эффективная» ширина трещины на некотором удалении от ствола скважины  $r$ ,  $\mu$  – вязкость флюида,  $Q$  – скорость закачки флюида.

Следует учесть, что  $w(r)$  определяется с учетом поправок на толщину корки фильтра на стенках трещины. Более подробно зависимость ширины

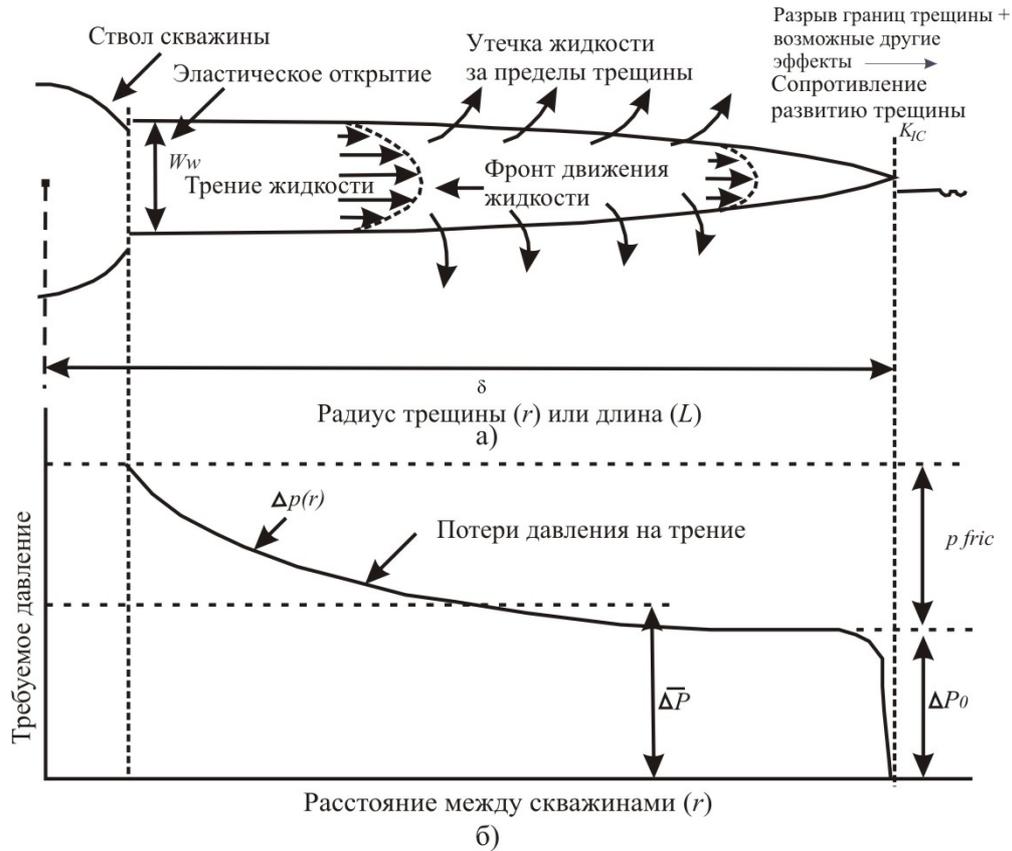


Рис. 1. Распространение трещины: а) схематический вид физических процессов, происходящих при распространении трещины гидравлического разрыва пласта; б) качественный анализ распространения давления в трещине

трещины от толщины фильтрационной корки описана ниже [2].

2. Упругое открытие трещины происходит в результате расширения флюида внутри трещины и внутреннего давления флюида на ее стенки. Движущей силой является давление разрыва  $\Delta p_w$  (рис. 1), которое равно разности давления жидкости в трещине и общего минимального пластового напряжения. Для протяженных трещин (т. е. общая длина трещины больше общей высоты трещины), установлена следующая зависимость упругого открытия:

$$w_{tot} = \frac{2H}{E'} \Delta p_w,$$

где  $w_{tot}$  – «общая» ширина трещины, т. е., ширина трещины с учетом корки фильтрата,  $H$  – общая высота трещины,  $E' = E/(1-\nu^2)$  – «плоскостная деформация», где  $E$  – модуль Юнга, а  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

При условии незначительного перепада давления в интервале перфорации и отсутствия влияния, вызванного извилистостью потока флюида, в призабойной зоне скважины давление разрыва  $\Delta p_w$  выражается, как

$$\Delta p_w = P_{внр} - P_{фср},$$

где  $P_{внр}$  – забойное давление,  $P_{фср}$  – давление смыкания трещины.

3. Разрыв породы в вершине трещины, при этом  $h$  – высота трещины (рис. 2). Сопrotивляемость по-

роды развитию трещины можно охарактеризовать ее механическими свойствами, которые иначе называют «ударной вязкостью» ( $K_{ic}$ ). Лабораторные испытания показали, что для того, чтобы трещина выросла до большой длины (более 0,1 м), напряжение растяжения ( $T$ ), выражаемое, как (рис. 2):

$$T = \frac{K_{ic}}{\sqrt{\pi L}},$$

(где  $L$  – длина трещины), должно преодолеть сопротивление породы. Следует отметить, что для образования «небольших» трещин (длиной менее 1 см), напряжение растяжения ( $T$ ), необходимое для разрыва породы, равняется пределу прочности породы на разрыв. Трещины «средней» длины (1 см <  $L$  < 10 см) развиваются при условиях, находящихся посередине между двух вышеуказанных крайних условий [3]. Так как трещины, образовавшиеся в результате гидравлического разрыва пласта (ГРП), можно охарактеризовать, как трещины большой длины, давление разрыва ( $\Delta p_0$ ) в отсутствие потери давления на трение равняется (рис. 2, б)

$$\Delta p_0 = \frac{K_{ic}}{\sqrt{\pi L}}.$$

Определенные в лабораторных условиях значения  $K_{ic}$ , как правило, находятся в пределах 1 МПа√м ( $\approx 1000$  пси√дюйм). В то же время, эти значения слишком малы, чтобы объяснить «ано-

мально высокое давление»  $\Delta p_0$  ( $\Delta p_0 = P_{ISIP} - P_{FCP}$  на рис. 2, 3, где  $P_{ISIP}$  – давление начала трещинообразования,  $P_{FCP}$  – давление закрытия трещины), которое отмечалось во время работ по ГПП с закачкой расклинивающего агента в скважинах на месторождении. Таким образом, модель PWRI-FRAC позволяет выполнять расчеты с более высокой ударной вязкостью породы на основании заложенных в модель значений аномально высокого (избыточного) давления  $\Delta p_0$ . Характерные значения  $\Delta p_0$ , отмечавшиеся в скважинах во время ГПП, находятся в пределах 500...1000 пси (3,5...7 МПа). Следует отметить, что значения  $\Delta p_0$  в трещинах, в которые осуществлялась закачка воды, были неизвестны.

4. Расслоенность и градиент пластовых напряжений. Общее минимальное пластовое напряжение  $\sigma_3(z)$  распределяется неравномерно. Как правило, оно зависит от глубины залегания породы  $z$  (рис. 3), и характеризуется «скачками» напряжений между различными пластами в сочетании с постоянным градиентом напряжения. На рис. 3 показан классический пример распространения механической трещины в песчаниках, контролируемых перекрывающим и подстилающим горизонтами глин. Разница в пластовом напряжении между перекрывающим горизонтом глин и пластом песчаников равняется  $S_1$ , а разница пластовых напряжений между подстилающим горизонтом глин и песчаниками равняется  $S_2$ . Кроме того, пластовое напряжение характеризуется постоянным градиентом ( $g$ ). В результате, темп роста трещины в верхнем и в нижнем направлениях будет отличаться от темпа роста трещины в длину. За счет разницы пластовых напряжений трещина имеет тенденцию расширяться возле своей вершины и основания, что способствует ее росту вверх и вниз. С другой стороны, градиент пластового напряжения больше способствует росту трещины вверх [1].

5. Баланс объема флюида, который означает, что объем флюида, закачанного в трещину, равен объему трещины плюс объем поглощающей зоны вокруг трещины. В модели PWRI, объем трещины, в целом, незначителен по сравнению с объемом поглощающей зоны.

6. Эффекты коэффициента изменения горизонтального напряжения в зависимости от изменения пластового давления и изменения горизонтального напряжения в зависимости от разности температуры закачиваемого флюида и породы во время закачки воды. Когда осуществляется закачка воды в пласт, насыщенный горячим флюидом, одновременно происходит охлаждение пласта и повышение давления в той части пласта, которая охвачена заводнением. Можно продемонстрировать, что понижение температуры приводит к усадке породы, в результате чего происходит заметное уменьшение минимального горизонтального напряжения вокруг трещины (сжатие за счет эффекта изменения горизонтального напряжения за счет изменения температуры). Поровое давление, напротив, увеличивается, что приводит к увеличению общего минимального горизонтального напряжения вокруг трещины (расширение за счет изменения напряжения из-за изменения давления). На рис. 5 приводится схематическое изображение трещины ГПП, окруженной зонами с различной мобильностью флюида (вид сверху). К трещине непосредственно примыкает зона пласта, поврежденная глубоким проникновением загрязненной воды. Далее рассмотрим эту зону подробнее. Охлажденная зона пласта продолжается за пределами поврежденной зоны. Площадь охлажденной зоны зависит от теплового баланса, т. е. количество тепла, поглощенного холодной нагнетаемой водой, должно быть равно количеству тепла, отобранного холодной нагнетаемой водой из охлажденной зоны пласта. За пределами охлажденной зоны находится зона теплой нагнетаемой воды, далее которой находится нефтенасыщенная зона пласта (при заводнении) или законтурная водоносная область (при сбросе воды в водоносный горизонт).

Модель PWRI-FRAC рассчитывает изменения горизонтального напряжения от изменения давления и изменения горизонтального напряжения от изменения температуры на основе геометрии, приведенной на рис. 4. Формулы расчета следующие:

$$\Delta \sigma_{\text{poro-elastic}} = A_p (p_{\text{fracture}} - p_f) g_p (L, H, B_{\text{floodfront}}),$$

$$\Delta \sigma_{\text{thermo-elastic}} = A_t (T_{\text{fracture}} - T_f) g_t (L, H, B_{\text{temp front}}).$$

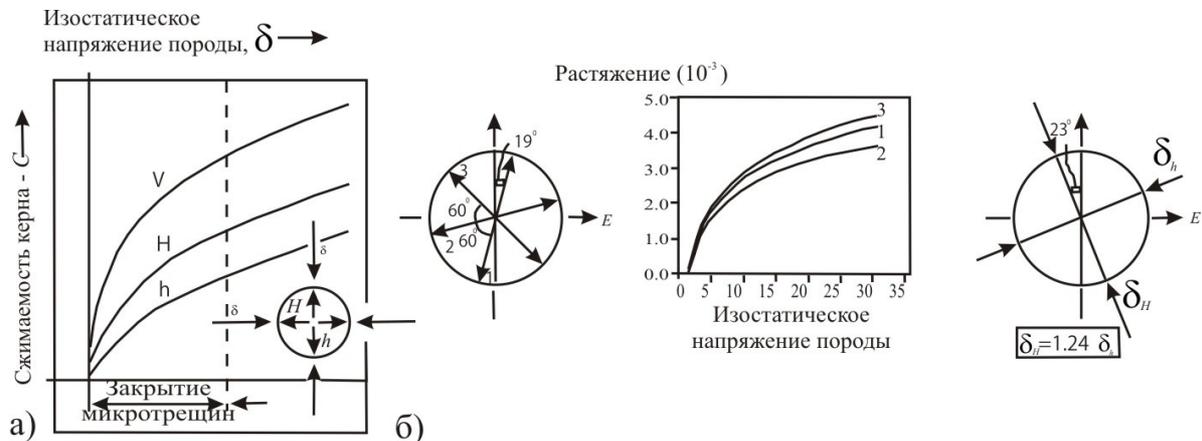


Рис. 2. Анализ перепада давлений (DSA): а) схема; б) DSA – Sole pit sandstone – анализ перепада давлений – песчаник

где  $A_T$  – коэффициент изменения горизонтального напряжения в зависимости от изменения пластового давления,  $p_{fracture}$  – давление трещинообразования,  $p_f$  – пластовое давление,  $T_{fracture}$  – температура в охлажденной зоне пласта непосредственно вокруг трещины,  $T_f$  – пластовая температура,  $g_p, g_t$  – геометрические коэффициенты, которые зависят от  $L, H$  и глубины проникновения фронта нагнетаемой воды ( $B_{inj,front}$ ) или фронта охлажденной зоны ( $B_{cooled,front}$ ) (рис. 4),  $A_r$  – коэффициент сокращения напряжения за счет разности температур закачиваемого флюида и породы (стандартное значение 100 кПа/°C), и может быть выражен зависимостью:

$$A_T = \alpha \frac{E}{1 - \nu},$$

где  $\alpha$  – тепловое расширение/коэффициент сжатия (°C<sup>-1</sup>).

Следует отметить, что величины  $L, H$  и  $B_{inj,front}/B_{cooled,front}$  зависят от продолжительности закачки [1].

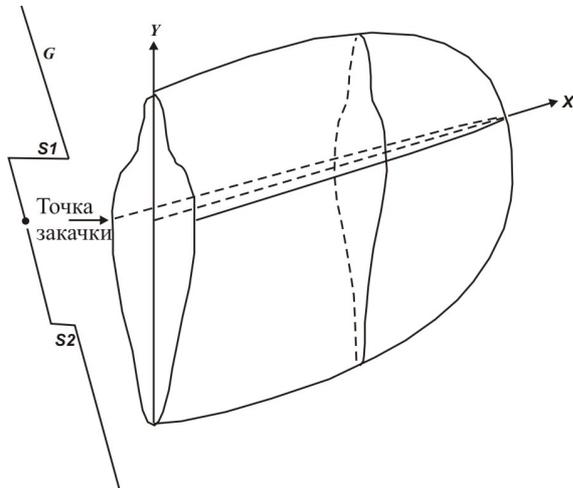


Рис. 3. Геометрия частично сдерживаемой трещины

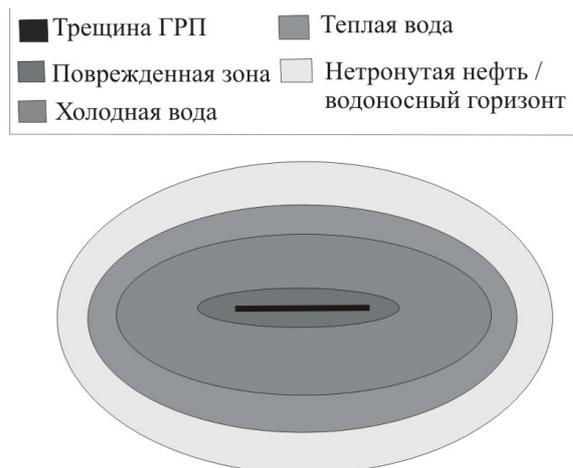


Рис. 4. Околоскважинные зоны

$A_r$  пропорционален  $E$ , таким образом, при одинаковом значении коэффициента теплового расширения ( $\alpha$ ), в более твердой породе в результате охлаждения термоупругие напряжения будут выше, чем в

мягкой породе. Этот вывод, в целом, подтверждается фактическими промысловыми данными [1].

При ГРП с закачкой расклинивающего агента короткой продолжительности, поровое давление и глубина проникновения температуры в пласт меньше, что незначительно влияет на пластовое напряжение. Напротив, при ГРП с продолжительной закачкой воды, поровое давление и глубина проникновения температуры значительны, и вызывают существенные изменения пороупругих и термоупругих напряжений вокруг трещины [3, 4].

Чистое изменение пластового напряжения обусловлено соотношением возросшего порового давления и понизившейся температуры. Изменение пластового напряжения, в целом, является результатом добавления отдельных изменений, выражающихся в понижении температуры и в повышении порового давления. Эти воздействия проиллюстрированы на рис. 5, где показаны изменения общего напряжения за счет понижения температуры и роста порового давления на примере высокопроницаемых песчаников шельфа Северного моря через два года после начала интенсивной закачки воды.

В данном случае, влияние температуры преобладает над влиянием порового давления, и общее уменьшение пластового напряжения составляет приблизительно 10 % от расчетной величины начального минимального напряжения, равного 500 ата [3]. На рис. 6 приведен пример вертикального распределения изменения общего пластового напряжения за счет охлаждения породы, указывающий на то, что это влияние температуры, в целом, остается приуроченным к пласту-коллектору, благодаря низкой теплопроводности плотной покрывки и коренной породы подошвы залежи. Этот эффект эквивалентен барьеру на границах между коллектором и его покрывкой и подошвой, который может стать преградой на пути развития трещины.

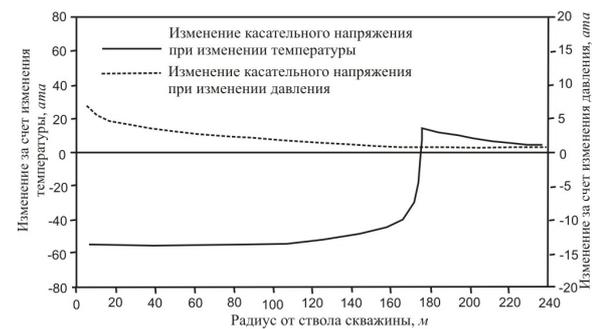


Рис. 5. Зависимость изменения касательного (окружного) напряжения от изменения порового давления/температуры (песчаник)

Обратной ситуацией вышеприведенному примеру является ситуация, когда закачка воды осуществляется в коллектор, сложенный плотными карбонатами. В этом случае, общее пластовое напряжение может увеличиться за счет роста порового давления, которое преобладает над воздействием, оказываемым понижением термоупругого на-

пряжения (рис. 7). Тогда любой барьер на пути распространения пластового напряжения, который мог изначально существовать между коллектором и крышкой, может быть преодолен после продолжительной закачки воды в пласт.

7. Повреждение пласта вокруг трещины в результате закачки пластовых вод.

Несмотря на многочисленные попытки создать модель, позволяющую прогнозировать степень повреждения пласта, вызванного закачкой попутной пластовой воды, содержащей углеводороды и твердые примеси, на сегодняшний день такой модели не существует. Поэтому в модели PWRI-FRAC предложено использовать простейшую модель повреждения пласта, включающая в себя ряд параметров, которые можно адаптировать по результатам промысловых испытаний. Негативное воздействие на пласт в результате закачки попутной воды с давлением выше давления ГПП учтено с помощью следующих параметров:

1. Поврежденная зона вокруг трещины (рис. 4), характеризующаяся равной степенью повреждения пласта.
2. Корка отфильтрованной твердой фазы с равным распределением проницаемости.
3. Закупорка канала трещины.

Ниже подробно рассмотрим каждый из этих факторов.

**Поврежденная зона.** Поврежденная зона (рис. 4) — это зона пласта, непосредственно примыкающая к трещине, которая повреждается в результате проникновения в нее загрязненной примесями закачиваемой воды [1]. Лабораторными исследованиями, проводившимися в рамках совместного проекта PWRI, установлено, что ухудшение коллекторских свойств вокруг трещины практически полностью обусловлено закачкой попутной воды с содержанием нефти. Твердые частицы в пласт не проникают. Замеренная остаточная водопроницаемость пласта в поврежденной зоне оказалась равна предельному значению относительной водопроницаемости. Таким образом, предельное значение относительной водопроницаемости позволяет достаточно точно определить «коэффициент повреждения» этой зоны пласта, который является одним из исходных параметров в модели PWRI-FRAC.

**Корка отфильтрованной твердой фазы на стенках трещины.** Лабораторные исследования в рамках проекта PWRI показывают, что содержащиеся в закачиваемой попутной воде твердые примеси образуют корку фильтрата, покрывающую стенки трещины. Измерениями было установлено, что проницаемость корки фильтрата находится в интервале от 5 до 20 мДарси. В менее проницаемых породах и с водой, содержащей тяжелую нефть, проницаемость корки фильтрата понижается.

**Закупорка канала трещины.** Когда на стенках трещины начинается отложение корки фильтрата, перестают проникать в пласт, примыкающий к тре-

щине. В случае медленно растущей трещины, толщина корки фильтрата становится шириной трещины, что ведет к закупорке трещины изнутри твердыми частицами, а «эффективная» ширина трещины приблизится к нулю, что приведет к потерям давления на трение. В модели PWRI-FRAC влияние корки фильтрата на поток воды в трещине принято локализованным в свищах, которые формируются в корке фильтрата. Формирование свищей в корке фильтрата существенно снижает потери давления на трение. Степень закупорки канала трещины, в которой начинают формироваться свищи, учитывается в модели путем ввода переменной  $f_{crit}$ . Переменная  $f_{crit}$  определяется, как соотношение между «эффективной» толщиной трещины и общей толщиной трещины, при которой начинается формирование свищей.

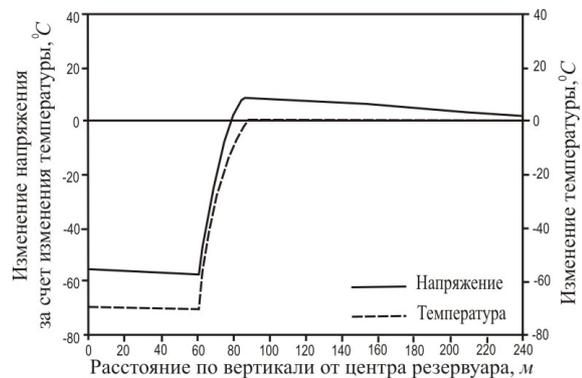


Рис. 6. Температура и распределение напряжения вследствие эффекта охлаждения (песчаник)

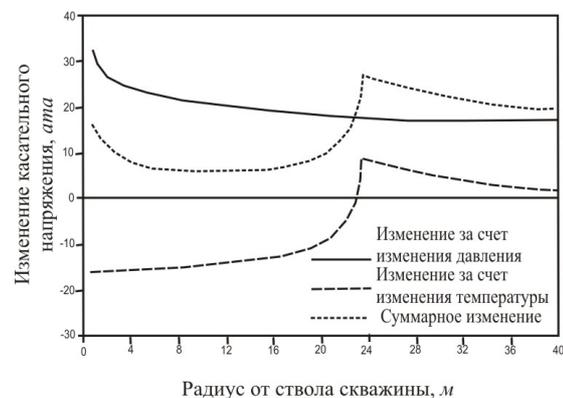


Рис. 7. Изменение окружного напряжения вследствие порогового давления/температуры (известняк)

Значение порядка величины для  $f_{crit}$  рассчитывается с учетом силы, действующей на отдельную частицу корки фильтрата на внешней поверхности. Закачиваемая жидкость создает сдвигающие усилия, а жидкость, поглощаемая прилегающим пластом и текущая перпендикулярно поверхности трещины в пласт, создает нормальные осевые усилия. Под действием сдвигающих усилий частицы фильтрата стремятся отделиться от корки фильтрата, а нормальные осевые усилия стремятся удерживать их на месте. Критическую эффективную толщину трещины, при которой частица фильтрата

начнет отделяться от поверхности корки фильтра, можно рассчитать, применив стандартный критерий скольжения к осевым и сдвигающим усилиям, действующим на эту частицу [3]:

$$w_{crit}(r) = \sqrt{\frac{2k_e L}{D_{part} f} \cos^{-1}\left(\frac{r}{L}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{L}\right)^2}},$$

где  $k_e$  – проницаемость корки фильтра,  $0 \leq r \leq L$ ,  $D_{part}$  – диаметр частицы корки фильтра,  $f$  – коэффициент скольжения.

По результатам лабораторных исследований в рамках совместного проекта PWRI была определена величина  $f \approx 10^{-3}$  [3]. Из приведенной выше формулы видно, что критическая эффективная ширина трещины, при которой начинается разрушение корки фильтра, увеличивается пропорционально квадратному корню длины трещины. Поскольку общая ширина растущей трещины ( $w_{tot}$ ), как правило, тоже почти пропорциональна квадратному корню длины трещины, можно предположить, что

значение коэффициента  $f_{crit}$  не зависит от длины трещины. Указанную формулу можно использовать для расчета порядка величины коэффициента  $f_{crit}$ . При типичной проницаемости корки фильтра в 10 мДарси длина трещины будет равна 100 м, а размер частиц – 1 мкм. Получаем величину  $w_{crit}$  порядка 1 мм. Для «стандартной» максимальной ширины трещины в модели PWRI, равной приблизительно 10 см, это отвечает значению  $f_{crit}$  порядка 0,01. Это соответствует значению, полученному путем адаптации модели PWRI-FRAC к промышленным данным. Таким образом, рекомендуемое значение коэффициента  $f_{crit}$  равно 0,01.

Программный продукт PWRI-FRAC, являющийся частью интегрированной системы Petroleum Expert, позволяет производить моделирование трещины для нагнетательных и поглощающих скважин при давлении закачки выше давления гидро разрыва пласта, оценивать прогнозные параметры трещины (длина, высота, ширина) и прогнозировать возможные последствия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван ден Хоук П.Дж., Волчков Д., Бургос Г., Масфри Р.А. Применение нового метода интерпретации кривой падения давления для исследования водонагнетательных скважин, закачивающих в условиях трещинообразования на шельфе о. Сахалин // SPE Российская Нефтегазовая Техническая Конференция: Матер. 3-ей Всерос. конф. SPE по разработке месторождений нефти и газа – г. Москва, 3–6 октября 2006. – С. 34–43.
2. Жидкова Н.А., Захарова А.А. Применение программного комплекса PWRI-FRAC для моделирования трещины при давлении выше давления ГРП в поглощающих скважинах. // Приоритетные направления развития науки и технологий: Матер. Всерос. научно-техн. конф. – г. Тула, 25 ноября – 7 декабря 2007. – С. 186–188.
3. Van den Hoek P.J., Sommerauer G.S. Technical user guide for Water Injection above fracturing conditions using PWRI-FRAC // SI-EP 99-5662. – Rijswijk, 1999 – P. 65–78.
4. Petroleum Experts. Integrated Production Modeling and Field Management Tools [Электронный ресурс] режим доступа – <http://www.petex.com/products> – 05.08.08.

Поступила 26.09.2008 г.