

На правах рукописи



Валов Александр Викторович

**Сопряженные термо-гидромеханические
контактные задачи развития трещин**

Направление 01.06.01 — «Математика и механика»
Направленность 1.1.9 — «Механика жидкости, газа и плазмы»

Текст научного доклада

Новосибирск — 2022

Общая характеристика работы

В данной работе представлена полностью связанная термoporоупругая модель обсаженного и цементированного ствола скважины, учитывающая начальное напряжение в цементной оболочке вследствие гидратации (химической усадки/разбухания), смещение обсадной колонны относительно оси скважины и неравномерность геологических напряжений. Геометрические характеристики скважины таковы, что характерный вертикальный размер (тысячи метров) значительно превышает горизонтальный масштаб (сантиметры), что позволяет рассматривать задачу в приближении плоской деформации в поперечном сечении, перпендикулярном стволу скважины. Потенциальное разрушение цементной оболочки определяется с помощью критерия Мора-Кулона. Это позволяет определить точку инициации и момент времени разрушения. Распространение трещин является более сложной нелинейной задачей, которая в данной главе не рассматривается. Отслоение цементной оболочки на границе контакта с обсадной колонной и породой описывается критерием максимальных растягивающих напряжений и сравнением с прочностью адгезии материалов.

Также в работе особое внимание уделено развитию семейства моделей Planar3D, поскольку в настоящее время они являются наиболее популярными при проектировании дизайнов ГРП. Высокие требования к эффективности численных алгоритмов и ограничения на время выполнения моделирования требуют совершенствования существующих моделей и подходов. Кроме того, финальным этапом процедуры ГРП является остановка насосов, которая приводит к закрытию трещины ГРП. Поэтому важно иметь возможность моделировать не только раскрытие трещины, но и ее смыкание. В данной работе представлен контактный алгоритм, который является вариацией метода множителей Лагранжа и позволяет корректно моделировать закрытие трещины с корректным учетом утечки жидкости в пласт на этапе смыкания берегов трещины. Реализованный контактный алгоритм не увеличивает число степеней свободы, что положительно сказывается на общей эффективности численного алгоритма. Отдельное внимание уделяется задаче многостадийного гидроразрыва пласта. В работе разработана явная схема сопряжения параллельных трещин, развивающихся на одной наклонной скважине и проанализировано влияние угла наклона скважины на геометрические характеристики трещин. Результаты моделирования валидированы на имеющихся численных и экспериментальных данных. Кроме того, было выполнено сравнение с аналитическими решениями для предельных режимов распространения радиальной трещины.

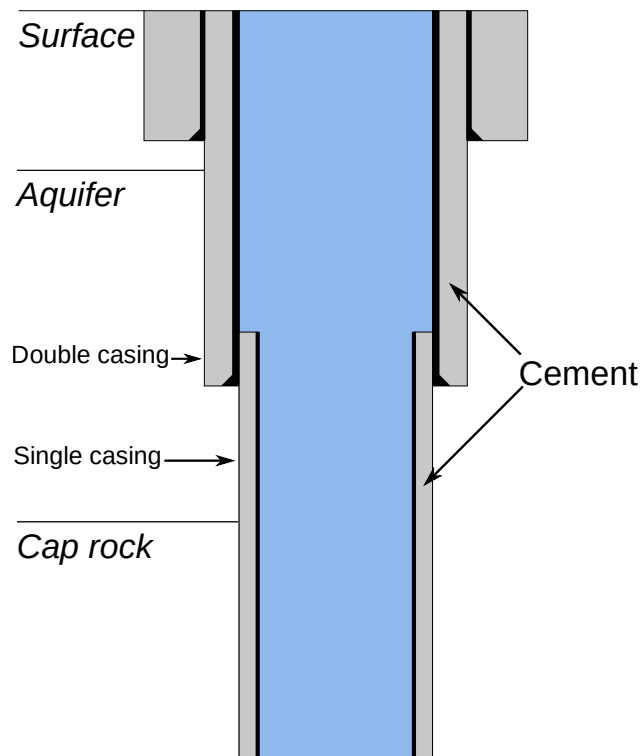


Рис. 1 — Схема конструкции скважины.

Содержание работы

Во введении была обоснована актуальность темы исследований, приводится обзор существующих подходов и методов, сформулированы основные результаты, полученные в ходе исследования.

В первой главе была построена полностью связанная термoporоупругая модель устойчивости цементной оболочки обсаженного и цементированного ствола скважины (см. рисунок 1). Модель учитывает вложенную структуру скважины, контраст геологических напряжений и смещение обсадной колонны относительно оси скважины. Также было учтено влияние начальных напряжений в цементной оболочке, которые возникают в процессе гидратации цемента. Результирующее напряженное состояние в цементе описывалось в терминах тензора начальных напряжений. В работе были рассмотрены наиболее характерные сценарии, соответствующие усадке и разбуханию цемента. Задача решалась численно с помощью метода конечных элементов. Была выполнена верификация модели путем сравнения с точными решениями в осесимметричном случае.

С помощью численного моделирования было проанализировано влияние различных факторов на образование зон разрушения или отслоения цементной оболочки. На основе проведенного анализа было показано, что для неперфорированной скважины риск отслоения цементной оболочки на границе сталь/цемент или цемент/порода крайне низок. Контраст геологических напряжений может оказывать существенное влияние на

вероятность разрушения цемента. В случае высокопроницаемого цемента резкие изменения порового давления или температуры незначительно влияют на устойчивость цементной оболочки, в то время как для низкопроницаемого цемента колебания температуры вызывают существенные изменения порового давления, что может приводить к разрушению. Таким образом, в скважинах, связанных с высокотемпературными операциями предпочтительно использовать высокопроницаемый цемент для предотвращения разрушения. В случае двух вложенных обсадных колонн изменение температуры и порового давления существенно влияет на напряженно-деформированное состояние и может приводить к разрушению внутренней цементной оболочки даже в случае высокопроницаемого цемента. Расчеты показывают, что именно сочетание различных факторов (колебания температуры, смещение обсадной колонны, начальное напряжение и т.д.) может вызвать повреждение цементной оболочки, в то время как каждого отдельного фактора может быть недостаточно для разрушения.

Во второй главе была рассмотрена задача распространения плоских трещин гидроразрыва пласта в слоистой среде (см. рисунок 2). Была описана численная реализация модели в рамках подхода Planar3D ILSA. Численный алгоритм основан на методе разрывных смещений в сочетании с методом конечных объемов. Для отслеживания положения фронта трещины использовано универсальное асимптотическое решение, которое учитывает разномасштабные процессы, протекающие в вершине трещины. Также был разработан контактный алгоритм, позволяющий рассчитывать не только раскрытие трещины, но и ее закрытие вследствие различных факторов, таких как остановка закачки, шероховатость стенок трещины или образование плотной упаковки частиц проппанта. Построенный контактный алгоритм является модификацией метода множителей Лагранжа. Одним из основных преимуществ описанного алгоритма является то, что при решении контактной задачи не увеличивается число степеней свободы, что позволяет эффективно моделировать как раскрытие, так и закрытие трещины ГРП.

Кроме того, была построена модель распространения множественный параллельных трещин гидроразрыва на одной скважине. При построении модели использовалось предположение, что трение на перфорациях существенно. Это приводит к равномерному распределению потоков жидкости между трещинами на одной скважине. Для расчета механического взаимодействия трещин была построена явная схема. Это позволило выполнять расчет трещин независимо друг от друга, а взаимное влияние учитывать в терминах дополнительного сжимающего напряжения, вызванного раскрытием соседних трещин. Разработанный подход позволяет эффективно моделировать многостадийный гидроразрыв пласта. Реализованная модель была верифицирована путем сравнения с аналитическими решениями для предельных режимов распространения радиальной трещины. Кроме

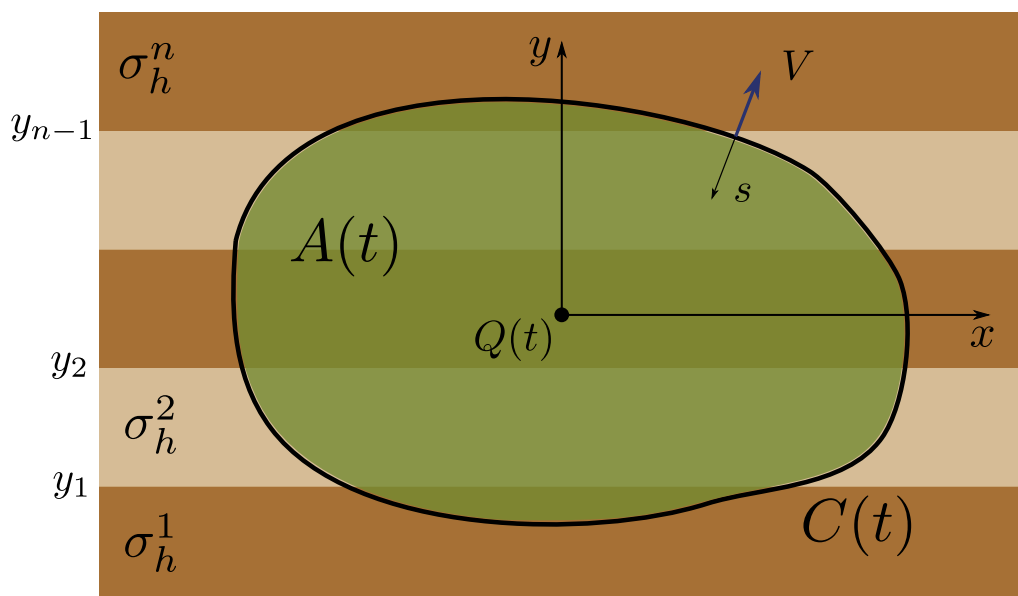


Рис. 2 — Схема плоской трещины в стоистой среде.

того, было выполнено сравнение с экспериментом, в котором рассматривалось распространение трещины ГРП между непроницаемыми блоками из полиметилметакрилата. Была показана устойчивость контактного алгоритма при расчете на различных сетках. Было проанализировано влияние наклона скважины на характер распространения множественных трещин на одной скважины. Была проанализирована зависимость геометрических характеристик трещин в зависимости от угла наклона скважины.

По теме квалификационной работы опубликовано 3 статьи в изданиях, индексированных в базах данных Web of Science и Scopus:

1. Valov A. V., Golovin, S. V., Shcherbakov, V. V., Kuznetsov, D. S. Thermoporoelastic model for the cement sheath failure in a cased and cemented wellbore //Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – Т. 210. – С. 109916.
2. Valov A. V. On the simultaneous growth of multiple hydraulic fractures emanating from an inclined well //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2057. – №. 1. – С. 012079.
3. Валов А. В., Байкин А. Н., Донцов Е. В. Моделирование геометрии плоской трещины гидроразрыва в рамках подхода Planar3D ILSA //XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. – 2019. – С. 333-335.