

Математическая модель движения проппанта в трещине гидроразрыва

А.С. Шляпкин¹, А.В. Татосов², Д.-ф.м.н.

¹Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени

²Тюменский гос. университет

Адреса для связи: ShlyapkinAS@tmn.lukoil.com, ATatosov@utmn.ru

Ключевые слова: трещина гидроразрыва пласта (ГРП), пористая среда, вязкая жидкость

В статье приведен краткий обзор математических моделей, используемых в коммерческих симуляторах гидроразрыва пласта (ГРП). В основе рассматриваемой математической модели лежит PKN-постановка, описывающая одиночную вертикальную трещину. Показан процесс формирования трещины ГРП при закачивании в скважину вязкой жидкости с примесью частиц. Предложена модель развития трещины с учетом потерь жидкости на просачивание в пористую среду и падения взвешенных частиц под действием силы тяжести. Проведен детальный анализ роста осадка, обусловленного просачиванием жидкости ГРП в пористую среду. Показано, что наличие частиц существенно влияет на процесс раскрытия трещины. Рост трещины при наличии частиц ограничен, окончательная ее форма зависит от состава смеси и способа закачки — давления на входе, объемного содержания частиц, объема оторочки (чистой жидкости ГРП без примеси). Все эти факторы учитываются в предложенной модели. Дано описание решения задачи о расчете параметров вертикальной трещины ГРП для реальной скважины. Выполнено сравнение с результатами расчетов, полученных на зарубежном аналоге модели. Результаты расчетов позволяют охарактеризовать остаточную форму трещины или подобрать технологические параметры при проведении ГРП.

The mathematical model of motion of propping agent in hydraulic fracture

A.S. Shlyapkin¹, A.V. Tatosov²

¹KogalymNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC in Tyumen, RF, Tyumen

²Tyumen State University, RF, Tyumen

E-mail: ShlyapkinAS@tmn.lukoil.com, ATatosov@utmn.ru

Keywords: hydraulic fracture, porous medium, viscous liquid

The short overview of the mathematical models used in commercial simulators of hydraulic fracturing is provided in work. At the heart of considered mathematical model the PKN statement describing single vertical crack lies. Process of forming of crack of hydraulic fracturing at injection in well of viscous liquid with impurity of particles is shown. The model of development of crack taking into account fluid losses on leakage in porous medium and falling of suspended particles by gravity is offered. The detailed analysis of growth of the deposit caused by fluid seepage of hydraulic fracturing in porous medium is carried out. It is shown that availability of particles significantly influences process of disclosure of crack. Crack growth in the presence of particles is limited, its final shape depends on blend composition and way of downloading — inlet pressure, the volume maintenance of particles, bank volume (pure liquid of hydraulic fracturing without impurity). All these factors are considered in the offered model. The solution of task on calculation of parameters of vertical crack of hydraulic fracturing for real-life well is described. Comparison with results of the calculations received on foreign analog is made. Results of calculations allow to characterize residual form of crack or to pick up technology parameters for achievement of desirable results at formation fracture.

В настоящее время большое количество скважин эксплуатируется с применением технологии гидроразрыва пласта (ГРП). В отдельных случаях проведение ГРП может приводить к негативным последствиям, в частности, преждевременному обводнению скважины в результате прорыва по трещине нагнетаемых или подошвенных вод. Для оценки и предупреждения подобных последствий, а также в целом для повышения успешности проведения ГРП и минимизации рисков широко используются симуляторы ГРП – специализированное программное обеспечение, позволяющее по набору входных параметров рассчитать геометрические параметры трещин, разработать рекомендации для проведения операции. Функционал существующих симуляторов ГРП включает множество опций, основные из которых приведены на рис. 1 [1]



Рис. 1. Основной функционал симуляторов ГРП

Поскольку априорная информация о развитии трещины и ее параметрах труднодоступна, при проведении ГРП целесообразно опираться на результаты моделирования в симуляторах. Однако сложность происходящих в пласте процессов (деформации), их нелинейность и сильное взаимное влияние большого числа факторов делают затруднительным создание единой модели. В общем случае для описания геометрии трещины требуется учет напряженно-деформированного состояния, влияния состояния скважины и перфорации, конструкции оборудования и режимов закачки жидкости разрыва, состава и свойств породы, учета собственной трещиноватости породы и др. Многофакторность процесса образования трещин обуславливает использование различных математических моделей (одномерных, двумерных, трехмерных и псевдотрехмерных).

Теоретические аспекты, описывающие формирование трещин ГРП, были рассмотрены в середине XX века [2–4]. Трещины в фундаментальных научных работах представлены в виде плоских сечений, их распространение возможно в продольном направлении, также вводятся допущения в отношении линейных размеров самой тре-

щины. Нелинейность уравнений, используемых для описания процесса зарождения, развития и формирования остаточной формы трещины, накладывает существенные ограничения на применение численных схем, применяемых для решения этих уравнений. Низкая сходимость приводит к существенному упрощению вычислительных сценариев, часто к уменьшению размерности самой задачи и рассмотрению ее как совокупности отдельных процессов. Примером может служить задача о поведении трещины в окрестности ее «носика».

Рассматривая классификацию существующих математических постановок, можно выделить четыре большие группы по признаку детализации описываемого процесса и, как следствие, размерности уравнений, входящих в систему [5, 6].

В одномерной постановке давление в трещине и ее ширина связаны между собой алгебраически или интегрально. Повышение размерности модели на единицу приводит к описанию системы с использованием теории плоских деформации. Наиболее сложные варианты с использованием трехмерных моделей позволяют точнее описать процесс развития трещины, спрогнозировать ее генеральное направление, однако в настоящее время они используются редко ввиду сложности вычислительных алгоритмов и сильной нелинейности. На практике чаще применяются так называемые псевдотрехмерные модели, в которых геометрия трещины описывается все тем же плоским сечением.

В существующих коммерческих симуляторах наиболее распространенными моделями трещин являются Planar 3D и Pseudo3D. Несмотря на предположение о плоском профиле трещины в псевдотрехмерных моделях, модель планарных (или плоских) трещин позволяет решать прикладные задачи со сложной структурой трещины, рассматривать двумерную задачу потока, а также описывать движение примеси частиц по трещине [7, 8].

Несмотря на то, что рынок программного обеспечения насыщен разнообразными симуляторами ГРП, научная деятельность в данной сфере не теряет своей актуальности. Из последних значимых программных комплексов, позволяющих моделировать ГРП, стоит отметить симулятор ГРП в составе комплекса РН-ГРИД компании «Роснефть» [8] и проект «КиберГРП», который реализуется в настоящее время на базе Научно-технического центра (НТЦ) «Газпром нефти», МФТИ, Сколковского института науки и технологий, Санкт-Петербургского политехнического университета, Института гидродинамики при участии Министерства науки и образования РФ.

Одним из направлений исследований, которые способны расширить функционал программного обеспечения, является моделирование трещин ГРП с учетом влияния вязкой смеси на поведение трещины. Данное направление представляется особенно важным ввиду недостаточной теоретической изученности процесса, а также отсутствия достаточного количества априорной информации о развитии трещины непосредственно в пласте. При таких условиях математический аппарат для прогнозирования развития трещины можно считать едва ли не единственным действенным инструментом, позволяющим строить прогнозные сценарии.

Рассмотрим некоторые результаты проведенных авторами научных исследований, включающих математическую постановку задачи для одномерного случая, описание движения пропанта по трещине ГРП и определение остаточной формы трещины с учетом процесса фильтрационных утечек жидкости ГРП в породу [9].

Для описания вертикальной трещины разрыва в работе используется постановка РКН (Perkins, Kern, Nordgren) [4]. Для задания локальной области трещины вводятся зона фильтрационных утечек Y и свободная от осадка зона ε , наличие которой определяет существование решения задачи в математическом смысле (рис. 2). Для геометрических размеров L , δ в рассматриваемой постановке справедливо соотношение: $\delta \ll h \ll L$ (h – высота трещины). Серым цветом на рис. 2 обозначена область формирования осадка за счет прилипания дисперсионной фазы к стенкам трещины и последующего стекания.

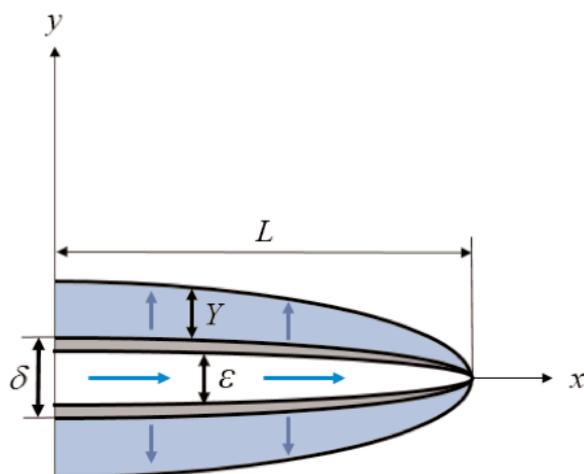


Рис. 2. Схематичное представление трещины ГРП

Основная система уравнений имеет вид [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial x} &= -2\nu; \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon u)}{\partial x} &= -\frac{2}{1-\alpha} \nu - \frac{\alpha}{1-\alpha} w; \\ \frac{\partial(\alpha \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \varepsilon u)}{\partial x} &= -\frac{2\alpha}{1-\alpha} \nu - \frac{\alpha}{1-\alpha} w; \\ u &= -\frac{b}{12\eta_\alpha} \delta^2 \frac{\partial \delta}{\partial x}; \\ \frac{\partial Y}{\partial t} &= \frac{\nu}{\beta}, \end{aligned} \tag{1}$$

где u – средняя скорость потока смеси, α – отношение объемной доли жидкости ГРП к объемному содержанию дисперсионной фазы в осевшем слое.

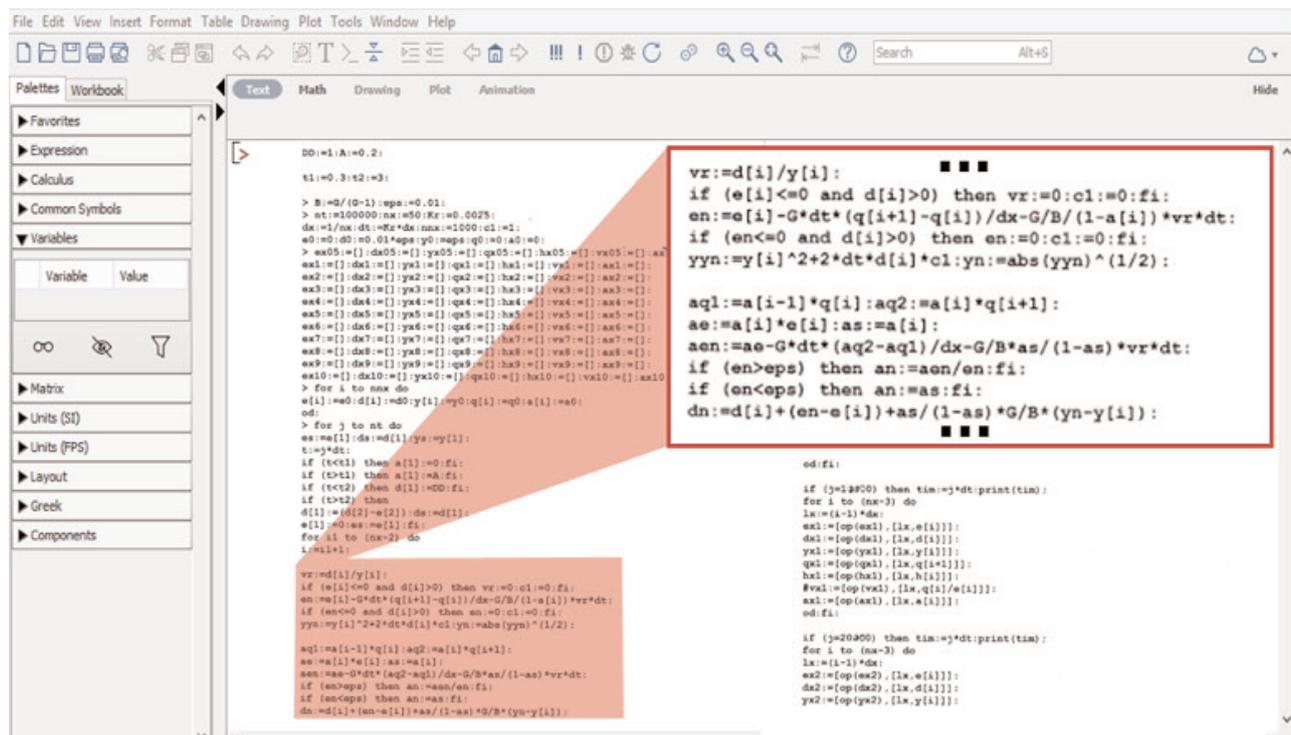


Рис. 3. Фрагмент кода программно-вычислительного модуля

Система (1) исследована численно с использованием явной схемы. Реализация математической модели выполнена с использованием системы компьютерной математики Maple. Фрагмент рабочего окна программы показан на рис. 3.

Проверка адекватности решения выполнена с использованием результатов моделирования в коммерческом симуляторе MFrac. В качестве входных параметров заданы свойства подаваемой смеси, время и интенсивность закачки, модули деформации. В результате выполненного расчета получены длины трещин, сопоставимые с результатами расчета на зарубежном аналоге. При этом наибольшая точность наблюдается при расчете ширины трещины. Для иллюстрации работы программного модуля, основанного на рассматриваемой математической модели, на рис. 4 приведены результаты расчетов состояния трещины в некоторый произвольный момент времени.

Подводя итог, отметим, что совершенствование методов моделирования ГРП необходимо как с экономической, так и научной точки зрения. Российские научные разработки в области математического моделирования имеют большое практическое значение для нефтяных компаний.

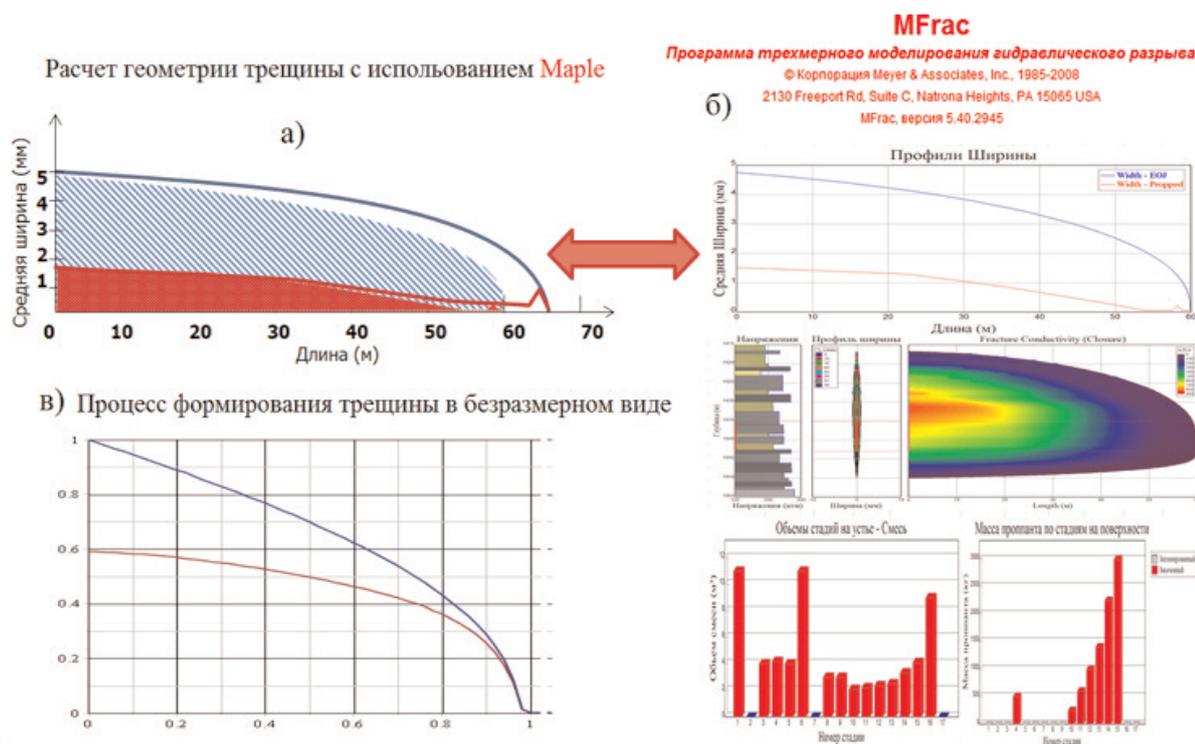


Рис. 4. Схема выполнения расчетов и проверки результатов моделирования

Список литературы

1. Computer simulation of hydraulic fractures // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – V. 44. – Issue 5. – 2007. – P. 739–757.
2. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтяного пласта // Изв. АН СССР. Отд. техн. н. – 1955. – № 5. – С. 3–41.
3. Geertsma J., De Klerk F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures // J. Pet. Tech. – 1969. – No. 12. – P. 1571–1581.
4. Perkins T.K., Kern L.R. Widths of hydraulic fractures // J. Pet. Tech., Trans. AIME. – 1961. – V. 222. – P. 937–949.
5. Методы моделирования зарождения и распространения трещины / С.Г. Черный [и др.] // Институт вычислительных технологий СО РАН. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. – 312 с.
6. Математические модели гидроразрыва пласта / Д.В. Есипов [и др.] // Вычислительные технологии. – 2014. – Т.19. – № 2. – С. 33–61.
7. Старобинский Е.Б., Степанов А.Д. Использование явной схемы интегрирования по времени при моделировании гидроразрыва пласта с применением модели Planar3D // PRОнефть. Профессионально о нефти. – 2019. – Т. 12. – № 2. – С. 15–19.
8. Валидация модели трещины гидроразрыва Planar3D, реализованной в корпоративном симуляторе «РН-ГРИД» / А.В. Пестриков [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2018. – № 11. – С. 46–50.
9. Татосов А.В., Шляпкин А.С. Движение пропанта в раскрывающейся трещине гидроразрыва пласта // Изв. Саратовского ун-та. Новая серия. Математика. Механика. Информатика. – 2018. – Т. 18. – Вып. 2. – P. 217–226.