УДК 622.276.66

ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ТРЕЩИН ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА

OVERVIEW CONTEMPORARY MODELS OF CRACKS OF HYDRAULIC FRACTURING

Пеньков Григорий Михайлович
магистр,
Санкт-Петербургский горный университет
penkovgrigoriy@gmail.com

Бакиев Максим Динарович
магистр,
Санкт-Петербургский горный университет
bakievmd@gmail.com

Лушпеев Владимир Александрович
кандидат технических наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет
lushpeev035@gmail.com

Penkov Grigoriy Mikhailovich
Master,
Saint Petersburg Mining University
penkovgrigoriy@gmail.com

Bakiev Maksim Dinarovich
Master,
Saint Petersburg Mining University
bakievmd@gmail.com

Lushpeev Vladimir Aleksandrovich
PhD in Engineering,
Saint Petersburg Mining University
lushpeev035@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассмотрены модели трещин гидравлического разрыва пласта. Произведен анализ сложных трехмерных и двумерных моделей трещин на основе численного моделирования, с учетом строения пласта, свойств жидкостей, расстановки скважин.

Ключевые слова: гидравлический разрыв пласта, моделирование, трещины, трехмерные модели, двумерные модели.

Annotation. The article describes the model of hydraulic fracturing. The analysis of complex three-dimensional and two-dimensional models of cracks on the basis of numerical modeling, taking into account the structure of the reservoir fluid properties, wells arrangement.

Keywords: hydraulicfracturing, simulation, cracks, three-dimensional models, two-dimensionalmodels.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) представляет собой механический метод воздействия на продуктивный пласт, состоящий в том, что порода разрывается по плоскостям минимальной прочности под действием избыточного давления, создаваемого закачкой в скважину жидкости разрыва с расходом, который скважина не успевает поглощать. Флюиды, посредством которых с поверхности на забой скважины передается энергия, необходимая для разрыва, называются жидкостями разрыва. После разрыва под воздействием давления жидкости трещина увеличивается, возникает ее связь с системой естественных трещин, не вскрытых скважиной, и с зонами повышенной проницаемости. Таким образом, расширяется область пласта, дренируемая скважиной. В образованные жидкостями разрыва трещины транспортируют зернистый материал (проппант), закрепляющий трещины в раскрытом состоянии после снятия избыточного давления.

В результате ГРП кратно повышаются дебит добывающих или приемистость нагнетательных скважин за счет снижения гидравлических сопротивлений в призабойной зоне и увеличения области дренирования, а также увеличивается конечная нефтеотдача за счет приобщения к выработке слабодренируемых зон и пропластков.

Метод ГРП имеет множество технологических решений, обусловленных особенностями конкретного объекта обработки и поставленной целью. Технологии ГРП различаются, прежде всего, по объемам закачки технологических жидкостей и проппантов и соответственно по размерам создаваемых трещин.

Трещина представляет собой узкий канал, располагающийся в горизонтальной плоскости. Трещина имеет большую длину и может перекрывать значительную высоту. Средняя раскрываемость трещины в низкопроницаемых коллекторах примерно 0,25 см, а длина иногда достигает нескольких сотен метров. Безусловно, в высокопроницаемых пластах трещина образуется большей ширины, которая достигает 5 см, а длина ее меньше.

Применительно к особенностям разных сфер приложения гидроразрыва пород развивались его теоретические основы и методы расчетов соответствующих физических процессов в породном массиве. При моделировании ГРП необходимо представлять механизм возникновения и распространения трещин в горной породе, что позволяет спрогнозировать геометрию трещины и оптимизировать ее параметры. В основе математического моделирования процесса трещинообразования лежат фундаментальные законы теории упругости, физики нефтегазоносных пластов, фильтрации и термодинамики.

Первые 2D модели образования трещины предложили С.А. Христианович и Т. Перкинс, Л. Керн. В конце 90-х годов русский ученый Ю.Д. Дядькин предложил свою модель трещинообразования с учетом такого параметра, как густота трещин, и попытался учесть естественную трещиноватость.

Первую модель распространения двумерной трещины (рис. 1), получившую всеобщее признание, предложил С.А. Христианович [2]. К основным параметрам единичной трещины относятся раскрытость, геометрические размеры (высота, длина, ширина), природа и ориентация единичных трещин и их распределение, т.е. плотность и интенсивность трещиноватости.

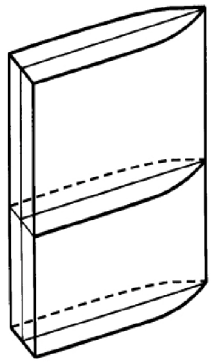

Рисунок 1 – Модель распространения вертикальной трещины

Особенности данной модели заключаются в следующем:

– рассматривается трещина одной и той же ширины на любой вертикальной координате в пределах фиксированной высоты;

– вертикальное поперечное сечение трещины – прямоугольник;

– горизонтальное сечение вертикальной трещины – эллипс с заострениями на концах трещины;

– распространение вертикальной трещины в горизонтальной плоскости.

С.А. Христианович в своей модели сделал некоторые упрощающие предположения о течении жидкости и сфокусировал внимание на механике трещин. Однако Перкинс и Керн (рис. 2) предположили, что механика трещин не столь важна, и сосредоточились на течении жидкости [9].

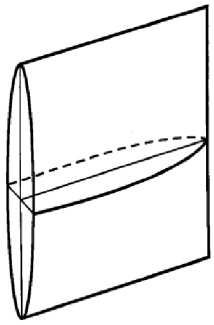

Рисунок 2 – Модель распространения вертикальной трещины

Особенности данной модели заключаются в следующем:

– эффективное давление равно нулю на вершине трещины;

– условие плоской деформации сохраняется в каждой вертикальной плоскости, нормальной к направлению распространения;

– вертикальное поперечное сечение трещины – эллипс;

– горизонтальное сечение вертикальной трещины – эллипс;

– распространение вертикальной трещины в вертикальном направлении.

В модели Ю.Д. Дядькина (рис. 3) одновременно учитывается взаимодействие гравитационно-тектонических напряжений при объемном развитии деформации в породном массиве со структурными ослаблениями и сил трения при неизотермическом течении в растущей трещине и фильтрационных утечках рабочей жидкости. При высоких скоростях радиального течения в прискважинной зоне учитываются инерционные эффекты, нарушающие линейный закон Дарси [1].

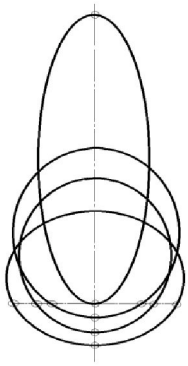

Рисунок 3 – Модель распространения трещины в зависимости от темпа нагнетания

Ю.А. Кашников и С.Г. Ашихмин в своей работе [3] не рассматривают технологию ГРП, а описывают методику разрушения горных пород под действием давления. В одной из глав они исследуют теорию о смыкаемости трещин. Рассматривая данную теорию, вводят такие понятия, как густота микротрещин, коэффициент охвата разреза трещиноватостью; также анализируют связь между боковым и пластовым давлением. Необходимо отметить, что учет перечисленных понятий очень важен при моделировании ГРП. В конце своей работы Ю.А. Кашников и С.Г. Ашихмин постулируют, что чем выше начальное пластовое давление, тем дольше работает трещинная составляющая и тем выше исходная продуктивность скважин. При этом продуктивность скважины после падения пластового давления полностью определяется поровой проницаемостью и начальной жесткостью трещин.

В работе [12] использовался метод Up-Scaling (масштабирование), который вводится как альтернатива методу дискретных элементов (DEM). DEM обычно используется для моделирования механики разрыва в естественно-трещиноватых массивах горных пород. Из-за большого числа степеней свободы и маленьких временных шагов в DEM, объем вычислений будет слишком большим. Для того, чтобы упростить вычисления, связанные с полномасштабным DEM моделированием, используется Up-Scaling, который представлен в REV. Данная методика позволяет калибровать параметры в CDM, которые будут в дальнейшем использоваться в FEA. Up-Scaling метод позволяет перейти от большой точной модели к модели в более крупном масштабе, для которой возможно сравнительно быстро производить расчеты, моделирование и адаптацию.

Представители Halliburton в статье [7] рассмотрели модель CFN, связывающую между собой геомеханическую составляющую, а именно естественную трещиноватость, трещины гидроразрыва, и течение жидкости. В данной работе, они сравнивают модель CFN с другими моделями (DEM, XFEM, CZM). Преимущество CFN над ними заключается в том, что она включает в себя влияние трещин и жидкости, но данная модель более сложная в вычислении. Данная модель сначала представляла собой числовой метод, учитывающий упругую механику горной породы и поток флюида, так как во время интегрирования численная схема выполнялась в неявном виде. Далее была произведена модернизация модели, заключающаяся в том, что теперь учитывалось взаимодействие естественной трещиноватости и трещин гидроразрыва.

Ниже приведен список параметров, входящих в эту модель:

- механика твердого тела;
- линейная упругость;
- плоская деформация;
- метод конечных элементов;
- модель динамики флюида;
- 1D поток внутри трещины;
- закон Дарси;
- распространение естественной трещиноватости;
- предел прочности на растяжение;
- предел прочности на сдвиг;
- распространение трещин гидроразрыва.

В этой модели, как и во всех других, есть свои ограничения, так как в ней не учитывается модель ствола скважины и утечки флюида.

В исследованиях Р. Праманик и др. [10] применили метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH). Бессеточный характер метода SPH имеет потенциал для преодоления трудностей, возникающих при дискретном способе моделирования. SPH метод позволяет численно интегрировать давление, которое стимулирует распространение трещин гидравлического разрыва, а также позволяет учитывать естественную трещиноватость. Метод SPH работает путём деления жидкости на дискретные элементы, называемые частицами. Эти частицы имеют пространственное расстояние (известное как «длина сглаживания» {\displaystyle h}), на котором их свойства «сглаживаются» функцией ядра. Это значит, что любая физическая величина любой частицы может быть получена путём суммирования соответствующих величин всех частиц, которые находятся в пределах двух сглаженных длин. Результаты, полученные в этой работе, показывают возможность SPH метода смоделировать ключевые физические явления, которые происходят в горном массиве в процессе трещинообразования. Данный метод требует дальнейшего совершенствования, чтобы смоделировать фактический процесс гидроразрыва, флюид и геомеханическую составляющую.

В работе [11] для моделирования трещин гидроразрыва используется метод решеток (LEM). В данном методе коллектор моделируется, как сеть решеток. Гидроразрыв моделируется путем удаления решеток, которые удовлетворяют определенным критическим значениям скорости трещинообразования горной породы. Посредством введения беспорядка в модель, зависимость роста трещины от сетки сводится к минимуму. Поток флюида моделируется, как поток жидкости в канале, проницаемость канала находится в кубической зависимости от толщины трещины. Основными элементами LEM являются решетка и узел (рис. 4). Один узел может быть соединен с помощью нескольких решеток, это значит, что одна ячейка может взаимодействовать с соседними ячейками. В 3D модели, решетка представляет собой общую поверхность, с которой взаимодействуют две ячейки (рис. 4).

В трудах Чонга Хайна Ахн [4] используется гидравлическая модель, которая имитирует распространение трещин гидроразрыва с учетом естественной трещиноватости. Модель учитывает взаимное влияние между распространением динамического разрушения и потока жидкости по всей области (трещины и матрицы). Численный метод используется для решения набора основных уравнений (поток флюида в коллекторе и уравнения распространения трещины). Используя изменение давления внутри матрицы и трещины вместе с изменением напряжений, а также процедуру итерации, вычисляются границы трещины (длина и ширина) на каждом временном шаге до и после гидроразрыва.

Кавех Амиди и др. [6] предлагают использовать модель P3D распространения трещины и 3D тепловую модель трещины, горного массива и ствола скважины. Данные модели рассматриваются в совокупности. Эта модель может быть использована для интерпретации данных распределения температуры (DTS) во время гидравлического разрыва пласта, для имитации температуры гидравлического разрыва, а также для разработки и анализа гидроразрыва в осложненных условиях.

В 2011 году специалистами Schlumberger и Chevron [8] была разработана нетрадиционная модель трещины (UFM), которая способна моделировать распространение сложной сети трещин в пласте с учетом естественной трещиноватости. Метод вычисления в сложной сети трещин (HFN) построен на базе улучшенного 2D метода. Для того, чтобы моделировать распространение сложной сети

трещин, состоящей из множества пересекающихся трещин, должны выполняться основные уравнения, определяющие физику процесса ГРП. К ним относятся: уравнение потока жидкости в сети трещин, уравнение, регулирующее деформацию разрушения и распространения трещины.

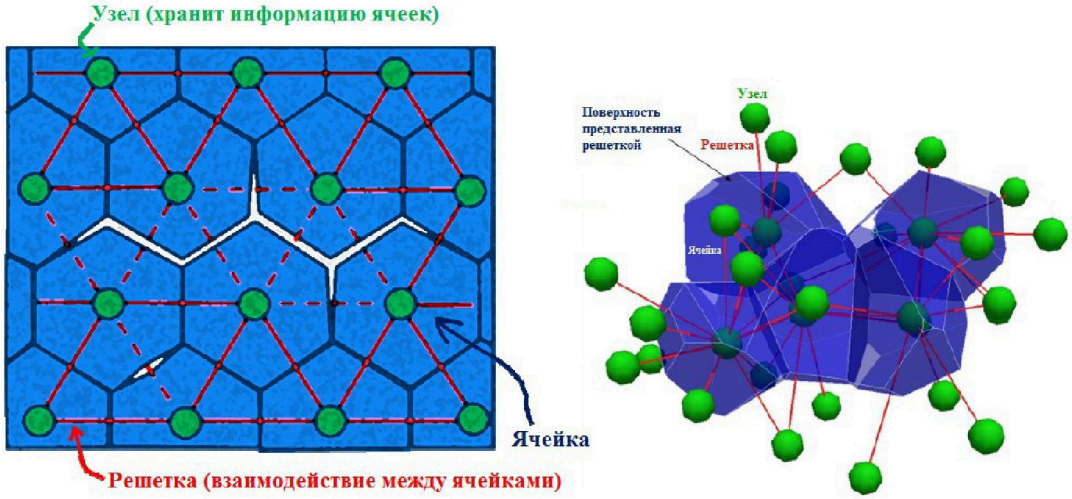

Рисунок 4 – Иллюстрация LEM и основных компонентов – узел, ячейка и решетка в 2D (слева) и в 3D (справа)

Описанные модели трещин ГРП можно использовать в расчетах основных показателей разработки при проектировании с применение геолого-гидродинамических моделей, а также для планирования геолого-технологических мероприятий и прогноза эффекта от них.

Для проектирования ГРП в полевых условиях перед самой операцией на скважине проводят, так называемый, мини-фрак с целью определения давления гидроразрыва и основных механических свойств горных пород в реальных условиях. Эта информация используется для дизайна ГРП в одном из программных комплексов. Наиболее распространенным и широко применяемым в США и России является программный комплекс Mfrac-3D (Mayer&Associates, Inc.), который позволяет визуализировать развитие и закрепление трещины в пласте и выполнять оценки технологической и экономической эффективности ГРП.

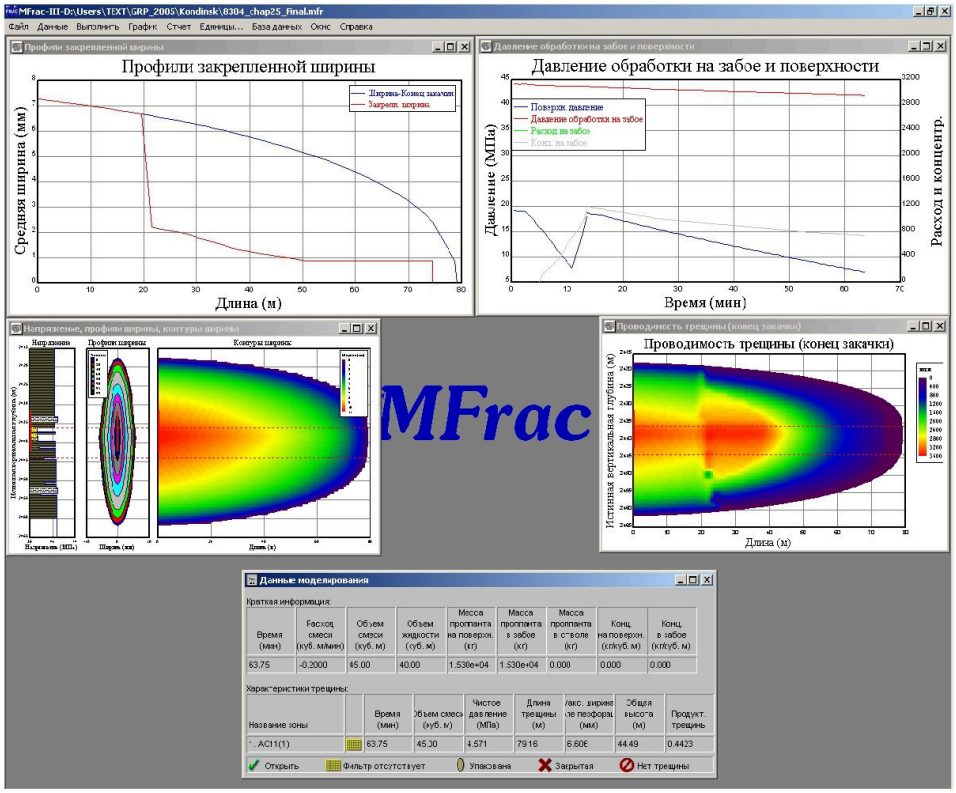

Рисунок 5 – Интерфейс программы MFrac-3D

Неоспоримым преимуществом программы MFrac-3D является возможность проведения расчетов и их визуализация непосредственно на скважине перед гидроразрывом, что позволяет оперативно выбрать технологию ГРП. Расчеты проводятся в станции управления флота ГРП.

Приведенные в работе модели трещин ГРП и технологии их расчетов и визуализации являются незаменимым инструментом инженера-разработчика нефтяных месторождений в современных условиях.

Литература:

1. Дядькин Ю.Д. Методика расчета и пути управления параметрами геотермального гидроразрыва. В кн. Проблемы геотермального энергии. Межд. симп. – Т. 2. – СПГГИ, 1995. – С. 80–98.
2. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Изв. АН СССР. ОТН. – 1955. – № 5. – С. 3–41.
3. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М. : Недра, 2007.
4. Ahn C.H., Dilmore R., Wang J.Y. Development of innovative and efficient hydraulic fracturing numerical simulation model and parametric studies in unconventional naturally fractured reservoirs //Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. – 2014. – V. 8. – P. 25–45.
5. Alfred R. Jennings, OGCI/PetroSkills Hydraulic Fracturing Applications // Alfred R. Jennings, Jr. PE Enhanced Well Stimulation, Inc.. – 2010. – 340 p.
6. Amini K. et al. A Three-Dimensional Thermal Model for Hydraulic Fracturing // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2015.
7. Bai J. et al. Coupled Geomechanics and Fluid Flow Computational Algorithm for Hydraulic Fracturing Simulations: Case Studies // 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – American Rock Mechanics Association, 2016.
8. Kresse O. et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations // Rock mechanics and rock engineering. – 2013. – V. 46. – № 3. – P. 555–568.
9. Perkins T.K, Kern L.R. Widths of hydraulic fracturing // J. Petrol.Techol. – 1961. – № 9. – P. 937–949.
10. Pramanik R. et al. An SPH Approach to the Simulation of Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Rock Medium // ARMA 50th US rock mechanics/geomechanics symposium. – 2016. – P. 26–29.
11. Wong J.K.W. et al. Three Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing on Fault using Lattice Element Method // 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics. – International Society for Rock Mechanics, 2015.
12. Yetisir M. et al. Up-Scaling DEM Simulations // 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – American Rock Mechanics Association, 2016.

References:

1. Dyadkin Yu.D. Calculation procedure and ways of management of parameters of geothermal hydraulic fracturing. In book Problems geothermal energy. Inter. simp. – V. 2. – SPGGI, 1995. – P. 80–98.
2. Zheltov Yu.P., Khristianovich S.A. About a hydraulic rupture of oil-bearing layer // Izv. Academy of Sciences of the USSR. OTN. – 1955. – № 5. – P. 3–41.
3. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G. Mekhanika of rocks when developing fields of hydrocarbonic raw materials. – M. : Nedra, 2007.
4. Ahn C.H., Dilmore R., Wang J.Y. Development of innovative and efficient hydraulic fracturing numerical simulation model and parametric studies in unconventional naturally fractured reservoirs //Journal of Unconventional Oil and Gas Resources. – 2014. – V. 8. – P. 25–45.
5. Alfred R. Jennings, OGCI/PetroSkills Hydraulic Fracturing Applications // Alfred R. Jennings, Jr. PE Enhanced Well Stimulation, Inc.. – 2010. – 340 p.
6. Amini K. et al. A Three-Dimensional Thermal Model for Hydraulic Fracturing // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Society of Petroleum Engineers, 2015.
7. Bai J. et al. Coupled Geomechanics and Fluid Flow Computational Algorithm for Hydraulic Fracturing Simulations: Case Studies // 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – American Rock Mechanics Association, 2016.
8. Kresse O. et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations // Rock mechanics and rock engineering. – 2013. – V. 46. – № 3. – P. 555–568.
9. Perkins T.K, Kern L.R. Widths of hydraulic fracturing // J. Petrol.Techol. – 1961. – № 9. – P. 937–949.
10. Pramanik R. et al. An SPH Approach to the Simulation of Hydraulic Fracture Propagation in Naturally Fractured Rock Medium // ARMA 50th US rock mechanics/geomechanics symposium. – 2016. – P. 26–29.
11. Wong J.K.W. et al. Three Dimensional Simulation of Hydraulic Fracturing on Fault using Lattice Element Method // 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics. – International Society for Rock Mechanics, 2015.
12. Yetisir M. et al. Up-Scaling DEM Simulations // 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. – American Rock Mechanics Association, 2016.