

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН ГИДРОРАЗРЫВА В СЛОИСТОМ ПОРОДНОМ МАССИВЕ

Евгений Николаевич Шер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт горного дела; им. Н.А. Чинакала» СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, тел. (383)205-30-30, e-mail: ensher@gmail.com

При гидроразрыве горных пород, широко применяемом в горном деле, важное значение имеет определение формы и размеров образующихся трещин. Большое значение при этом имеет структура породного массива, часто имеющего слоистое строение. В настоящей работе исследуется влияние разной прочности слоев и их напряженного состояния на формы развивающихся трещин. На примерах, с использованием численного моделирования, показано, что в условиях проведения гидроразрыва маловязкими жидкостями трещина преимущественно развивается в слое с меньшими значениями прочности на разрыв или величинами внешнего сжатия. Расчетами в рассмотренных случаях определены значения превышения прочности и внешнего сжатия, при которых происходит развитие трещин гидроразрыва только в одном слое. Показано, что увеличение вязкости жидкости разрыва уменьшает этот эффект.

Ключевые слова: слоистый породный массив, гидроразрыв, форма трещин, прочностные свойства слоев, напряженное состояние слоев

FEATURES OF PROPAGATION OF HYDRAULIC FRACTURES IN STRATIFIED ROCK MASS

Evgeny N. Sher

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Principal Researcher, +7 (383) 205 30 30, e-mail: ensher@gmail.com

In hydraulic fracturing commonly used in mining, it is important to determine the shapes and sizes of created fractures. The governing factor in this case is the structure of rock mass which is often stratified. This study analyzes the influence of strengths of the layers and their stress states on the shapes of the growing fractures. Numerical modeling shows that in hydraulic fracturing with low-viscous fluids, fractures grow mostly in a layer having lower tension or compression strengths. The calculations carried out for the analyzed cases provide the values of tension strength and external compression for hydraulic fractures to grow only in one layer. It is shown that the increase in the breakdown fluid viscosity weakens this effect.

Keywords: stratified rock mass, hydraulic fracturing, fracture shape, strength properties of layers, stress state of layers

Введение

Технология гидроразрыва широко применяется в горном деле, как при интенсификации добычи нефти и газа на нефтяных и газовых месторождениях [1], так и при дегазации угольных пластов [2], при добыче блочного камня, при со-

здании экранов в технологии выщелачивания, при разупрочнении труднообрушаемой кровли на угольных месторождениях [3]. Важной при использовании гидроразрыва является задача определения формы и размеров возникающей трещины. В настоящее время существуют программы расчета процесса развития трещин гидроразрыва на нефтяных и газовых месторождениях, учитывающие геомеханические данные пород месторождения, напряженное их состояние, технологические вопросы проведения гидроразрывов [4, 5]. Но при этом важна наработка понимания качественного влияния различных факторов, определяющих форму трещин гидроразрыва. Среди таких факторов важное значение имеет слоистое строение породного массива, характерное для нефтяных, газовых и угольных месторождений. При этом существенным является, как отличие физико-механических свойств пластов, так и напряженного их состояния [6]. В настоящей работе анализируется влияние различия прочностных характеристик слоев породы и поперечного к плоскости трещин сжатия на форму развивающихся трещин гидроразрыва.

Для расчетов использовалась разработанная раньше программа [7, 8], в которой для расчетов трехмерного напряженного состояния среды в упругом пространстве с плоской трещиной, нагруженных внутренним давлением в условиях внешнего сжатия, использовался метод разрывных смещений [9,10]. Поверхность трещин разбивается на квадратные элементы с шагом a , в пределах которых раскрытие и сдвиги берегов трещины считаются постоянными. Трещины представляются набором дислокационных элементов, описываемых векторами Бюргерса, компоненты которых заранее неизвестны. Находятся они из требования выполнения граничных условий в напряжениях в центрах дислокационных элементов трещины в результате решения соответствующей системы линейных уравнений относительно неизвестных компонент векторов Бюргерса. Коэффициенты такой системы уравнений находятся согласно методу суперпозиции через коэффициенты влияния элементов друг на друга. Для вычисления коэффициентов влияния используются формулы Пича – Келлера, позволяющие рассчитать компоненты тензора напряжений в произвольной точке упругого пространства рядом с дислокационным элементом через контурные интегралы от значений компонент соответствующего вектора Бюргерса вдоль его границы [11].

Эти же формулы применяются для расчета напряжений вблизи кромок трещин для определения возможного разрушения и их развития. За критерий разрушения принимается критерий Новожилова, согласно которому разрушение происходит, если среднее напряжение на характерном элементе среды a превосходит прочность на растяжение σ_t , [12]. Критерий Новожилова применительно к развитию трещин тесно связан с критерием Ирвина. Между критическим коэффициентом интенсивности напряжений на кромке трещины, определяющим трещиностойкость среды, и параметрами критерия Новожилова существует связь:

$$K_{IC} = \sigma_t \sqrt{\pi a / 2}$$

В разработанной программе напряжения, которые сравниваются с σ_t , определяются в центрах дислокационных элементов, примыкающих к кромке трещины.

Расчет развития трещины проводится по шагам, начиная с начальной трещины. На каждом шаге решается в дополнительных к внешнему сжатию напряжениях задача о нагружении берегов трещины давлением. Считается, что давление, создаваемое жидкостью разрыва, по площади трещины распределяется равномерно, при этом учитывается, что на каждом слое может быть свое напряжение внешнего сжатия. В результате решения для каждого элемента ближайшего окружения трещины определяется критическое давление p_c в ней, при котором на этом элементе напряжение превышает значение прочности σ_t среды в месте расположения элемента. После ранжирования элементов окружения, по значению рассчитанного для них значения критического давления p_c n_m элементов с минимальными значениями p_c считаются разрушенными и присоединяются к трещине. Величина n_m выбирается из условий повторяемости результатов при его варьировании и рационального сокращения времени расчёта.

Влияние различия прочностных характеристик слоев породы и поперечного к плоскости трещин сжатия на форму развивающихся трещин гидроразрыва исследовано в задачах о развитии начальной дисковидной трещины, образованной в пласте из горизонтальной скважины, на границе двух слоев (рис.1а) и в пласте ограниченном более прочными породами почвы и кровли (рис.1б).

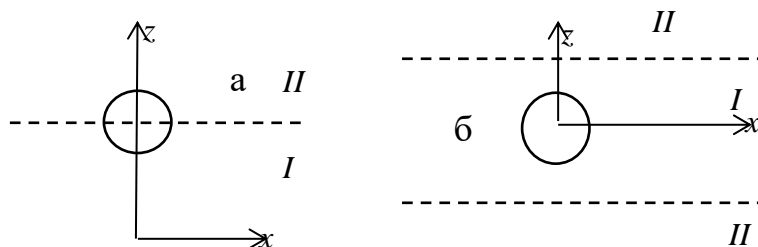


Рис. 1. Схемы расположения начальной дисковой трещины относительно слоев породного массива: а- на границе двух слоев *I* и *II*, б - в пласте *I*, граничащем с породами *II*

На рис.2 приведены в безразмерном виде, отнесенном к размеру расчетной ячейки a , примеры расчета форм трещин при гидроразрыве, соответствующем схеме рис.1а. Расчеты проведены при следующих параметрах сред: модуль Юнга $E = 3 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, прочность на растяжение среды *I* (при $z/a < 80$) $\sigma_p = 10^7$ Па. Значения прочности среды *II* (при $z/a > 80$) принималось в α раз большим. В расчетах, представленных на рис.1 а, б $\alpha = 1.005, 1.02$ соответственно. Значение напряжения внешнего сжатия в обеих средах принималось равным $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па

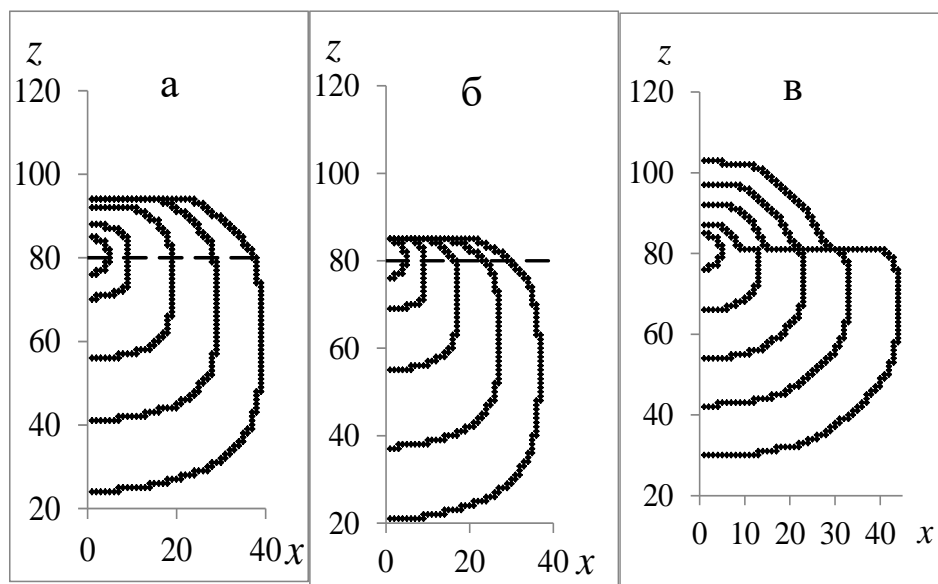


Рис. 2. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой на границе пластов разной прочности

На приведенном примере видно, что даже при небольшом контрасте прочности на разрыв или трещиностойкости слоев развитие трещины существенно меняется. Трещина преимущественно развивается в среде с меньшей прочностью и при этом попрежнему стремится сохранять форму близкую к круговой, центр которой смещается. Развитие трещины гидроразрыва, показанное в расчетах, в значительной степени определяется принятым предположением о равномерном распределении давления, оказываемого на берега трещины жидкостью разрыва. Такое предположение оправдывается при использовании для гидроразрыва маловязких жидкостей, например, воды. В тоже время при гидроразрыве, часто используют более вязкие жидкости, гели и даже вязкопластические вещества типа пластилина [13]. В этом случае нагрузка на берега трещины максимальна в месте закачки флюида разрыва. Качественно эффект такого нагружения можно смоделировать в предположении, что вновь образованные берега трещины свободны от нагружения. Были проведены расчеты развития трещины, начиная с начальной, в таком предположении при разных значениях α от $\alpha=1,1$ до $\alpha=5$. Оказалось, что заметное влияние увеличенной прочности верхнего пространства II рис.1а на форму трещин начинается с $\alpha=2$. Характерная картина такого влияния приведена на рис.2в. для случая $\alpha=5$. Видно, что даже при таком большом упрочнении верхнего пространства развитие трещины в нем значительно. Отсюда можно сделать вывод, что использование вязких флюидов разрыва снижает влияния разнопрочности слоев породного массива.

Аналогичное исследование по схеме рис.1а было сделано для случая разного внешнего сжатия слоев породного массива. Расчеты были проведены с теми же параметрами сред, что и в предыдущем случае, за исключением, того что

прочность слоев породы принималась одинаковой ($\alpha=1$), но различным было внешнее их сжатие: в нижнем слое I $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па, в верхнем в β раз больше. Результаты расчетов для $\beta=1,005$ и $\beta=1.02$ приведены на рис.3а, б соответственно. На этих рисунках видна аналогичная рис.2а, б картина развития трещины гидроразрыва в слоистом массиве. Увеличение поджатия верхнего слоя на $2.5 \cdot 10^5$ Па по отношению к уровню $p_{yy} = 5 \cdot 10^7$ Па приводит к заметному развитию трещины преимущественно в нижнем слое. При $\beta=1.02$ трещина развивается только в менее сжатом слое I.

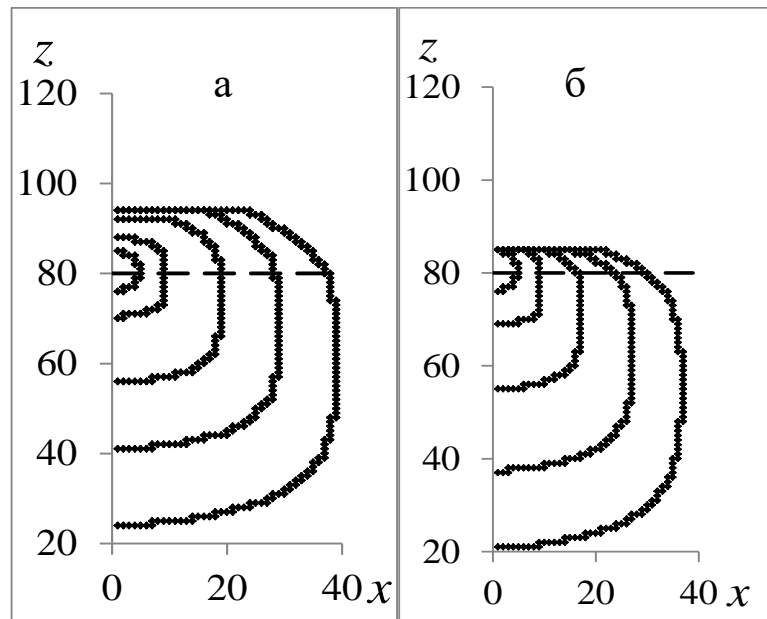


Рис. 3. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой на границе пластов с разным внешним сжатием: а – $\beta=1,005$, б – $\beta=1.02$

Практически важным является вариант развития дисковой трещины по схеме рис.1б. По такой схеме с использованием горизонтального бурения производятся гидроразрывы продуктивного пласта при добыче сланцевого газа. На первом этапе дисковая трещина развивается в плоскости, перпендикулярной скважине, которая бурится в направлении минимального внешнего сжатия. При ограниченной толщине продуктивного пласта, граничащего с более прочными породами, трещина начинает развиваться преимущественно вдоль пласта. Влияние контраста прочности слоев на такой процесс показан на рис 4 а, б, где в безразмерных координатах показаны в первом квадранте формы развивающихся трещин при пошаговом увеличении объема закаченной в них жидкости.

Отметим здесь, что пороговое значение α , при котором происходит проникание трещины в более прочную породу в случае развития трещины гидроразрыва по схеме рис1а, оказалось меньше, чем в случае схемы рис.1б. Возможно, это связано с тем, что в последнем случае трещина, развивающаяся в среде с по-

ниженной прочностью, оказывается в стесненных условиях из-за границ продуктивного пласта.

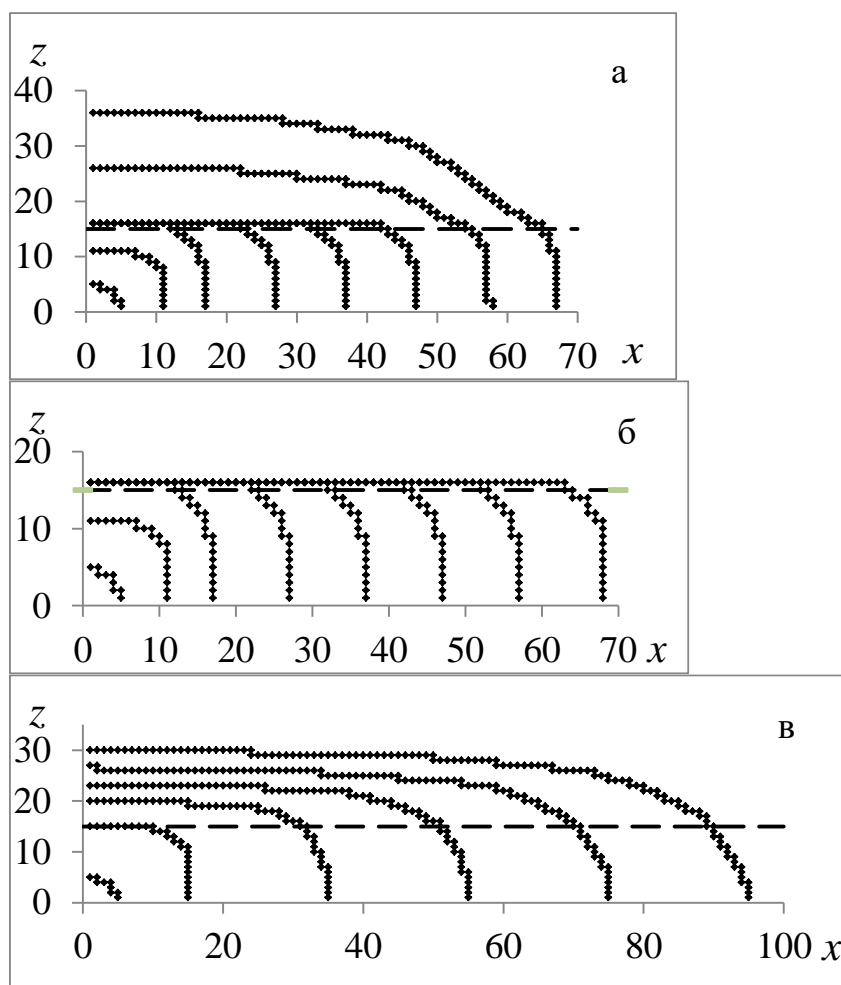


Рис. 4. Расчетные формы плоских трещин гидроразрыва, развивающихся последовательно из начальной круговой в пласте, ограниченном более прочными в α раз породами при $|z > 15|$: а – $\alpha=1.3$, б – $\alpha=1.4$ и более сжатыми в β раз: в – $\alpha=1$, $\beta=1.05$

Аналогичная ситуация по данным расчетов оказалась при развитии дисковой трещины в пласте, ограниченном породами с повышенным в β раз внешним сжатием. Пример таких расчетов приведен на рис.4в для случая $\alpha=1$, $\beta=1.05$. Предельным значением превышения внешнего сжатия пород, окружающих продуктивный пласт, оказалась величина $\beta=1.2$, что заметно больше предельного значения превышения сжатия в случае развития дисковой трещины на границе: $\beta=1.02$ (рис.3б).

Заключение

В работе с использованием численного моделирования исследуются особенности процесса развития трещин гидроразрыва в слоистом породном массиве,

сжатом горным давлением. Рассматривается влияние прочностных свойств слоев и их напряженного состояния на формы развивающихся трещин.

Были исследованы две схемы развития начальной дисковой трещины гидроразрыва, расположенной в вертикальной плоскости, перпендикулярной горизонтальным слоям породного массива: на границе двух сред и в пласте ограниченном более прочными породами, которым соответствуют большие значения внешнего сжатия.

На примере обеих схем было показано, что при своем развитии трещина гидроразрыва стремится развиваться в слое с меньшей трещиностойкостью и значениями напряжений внешнего сжатия. В наибольшей степени это, как отмечалось ранее в экспериментальных работах, характерно при использовании маловязких жидкостей разрыва. Расчеты настоящей работы подтвердили этот результат.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и образования Российской Федерации проект № АААА-А17-117121140065-7

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудряшов С. И., Бачин С. И., Никитин А. И. [и др.] Гидроразрыв пласта как способ разработки низкопроницаемых коллекторов // Нефтяное хозяйство – 2006. – № 7. – С. 80-83.
2. Сердюков С.В., Патутин А.В., Шилова Т.В., Азаров А.В., Рыбалкин Л.А. Технологии повышения эффективности разработки твердых полезных ископаемых с использованием гидроразрыва горных пород // ФТПРПИ. – 2019. – № 4. – С. 90-97
3. Леконцев Ю. М., Сажин П. В. Технология направленного гидроразрыва пород для управления труднообрушающимися кровлями в очистных забоях и дегазации угольных пластов // ФТПРПИ. – 2014. – № 5. – С.137 – 142.
4. Афанасьев, И. С. Никитин А. И., Латыпов И. Д. [и др.] Прогноз геометрии трещины гидроразрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 2009. – № 11. – С. 62–66.
5. Тимонов А. В., Судеев И. В., Пестриков А. В., Ситдииков С. С., Надеев А. Н., Юдин А. В., Никитин А. Н. Новая методология моделирования гидравлического разрыва пласта при разработке Приобского месторождения // Нефтяное хозяйство. - 2012. - № 3. - С. 58-61.
6. Н. В. Дубиня, А. Н. Галыбин О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород // Физика земли. – 2018. – № 6.– С. 106–116
7. Шер Е. Н., Черников А. Г. Расчет параметров радиальной системы трещин, образующихся при взрыве удлиненного заряда в хрупких горных породах // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2015. – № 2. – С. 299 – 303.
8. Е. Н. Шер Моделирование развития трещин в слоистом породном массиве при взрыве скважинных зарядов и гидроразрыве // ФТПРПИ. – 2020. – № 6. – С.137 – 142.
9. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 326 с.
10. K. Venerjee, R. Butterfield. Djunday element method in engineering science, McGraw-Hill, London, 1981.

11. Peach M. and Koehler J. S. The forces exerted on dislocations and the stress fields produced by them, *Phys. Rev.*, 1950, Vol. 80, No. 3. – P. 436–440.

12. Новожилов В. В. О необходимом и достаточном критерии хрупкой прочности // *ПММ.* – 1969. – Т. 33. – Вып. 2.

13. Кю Н.Г. Особенности разрушения горных пород при флюидоразрыве пластичным веществом. – *ФТПРПИ*, 2011, № 4, с. 39 – 50.

© *Е. Н. Шер*, 2021