

Подходы к определению хрупкости угольных пластов для оптимизации параметров проведения гидравлического разрыва пласта

**Енина Е.Д.* (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», froeze191@gmail.com),
Шишляев В.В. (ООО «Газпром ВНИИГАЗ», shishlyaev@yandex.ru)**

Аннотация

Хрупкость породы отражает способность твердого тела к разрушению без существенных пластических деформаций, которое влияет на выбор параметров проведения гидравлического разрыва пласта. Индекс хрупкости – ключевой параметр, определяющий способность угольного пласта формировать разветвленную сеть трещин при ГРП. В представленной работе рассмотрены подходы к определению индекса хрупкости углей, учитывающие различные влияющие факторы – упругие параметры, минеральный состав, прочностные параметры. Рассчитаны индексы хрупкости угольных пластов Кузбасса и на их основе определены рекомендации к проведению гидравлического разрыва угольных пластов.

Ключевые слова

Хрупкость, угольный пласт, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, гидроразрыв пласта

Теория

Хрупкость породы является одним из наиболее важных механических свойств горных пород, которая отражает способность твердого тела к разрушению без существенных пластических деформаций. На сегодняшний день исследователями предложены различные способы количественной оценки хрупкости горных пород, основанные на учете различных влияющих факторов – минерального состава, напряжений, параметров прочности и других. Величина хрупкости горной породы описывается индексом хрупкости.

Одним из часто используемых способов определения индекса хрупкости BI является зависимость, предложенная Рикманом [4]:

$$BI_1 = \frac{\frac{E - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} + \frac{\nu - \nu_{max}}{\nu_{min} - \nu_{max}}}{2}$$

где E и ν – модуль Юнга, Па, и коэффициент Пуассона соответственно, E_{max} и E_{min} – максимальные и минимальные модули Юнга на интервале соответственно, Па, ν_{max} и ν_{min} – максимальные и минимальные коэффициенты Пуассона на интервале соответственно. Стоит отметить, что данная формула является эмпирической, и результаты вычислений могут иметь высокую погрешность вследствие большой разницы порядков E и ν . При расчетах обычно используют динамические модули Юнга и коэффициенты Пуассона, так как они могут быть получены на основе Р и S-волнового анализа, а получение статических модулей Юнга и коэффициентов Пуассона возможно только с помощью лабораторных исследований.

Модуль Юнга и коэффициент Пуассона отражают взаимное влияние напряжений и деформаций в горной породе, и, соответственно, позволяют более точно количественно определить ее хрупкость по сравнению с методиками, основанными на прямом использовании напряжений и деформаций.

На образование трещин больше влияет модуль Юнга, чем коэффициент Пуассона. Более широкая область эффективного напряжения вокруг вершин трещины трансформируется в растягивающее напряжение в пластах с более высоким модулем Юнга, что приводит к образованию большего количества микротрещин вокруг основной трещины. Коэффициент

Пуассона влияет на вероятность возникновения трещины косвенно через изменение начального напряженного состояния массива горных пород – чем выше коэффициент Пуассона, тем выше минимальное эффективное напряжение и тем меньше трещин образуется [5].

Поскольку угольные пласты могут содержать значительное количество минеральных включений, геомеханические характеристики этих минералов также оказывают влияние на формирование трещины разрыва. Увеличению хрупкости угля способствует наличие таких минералов, как кварц, карбонатные и силикатные минералы, обладающие более высокой хрупкостью, чем глинистые частицы [3]. Предложены различные способы расчета индекса хрупкости на основе минерального состава, суть которых состоит в нахождении отношения содержания хрупких минералов к общему содержанию минеральных включений. В отношении состава углей Кузбасса формула будет иметь следующий вид:

$$BI_2 = \frac{W_Q + W_C + W_S}{W_{Total}}$$

где W_Q – масса кварца, W_C – масса карбонатных минералов, W_S – масса сульфидов, W_{Total} – общая масса минеральных частиц. Следует отметить, что два образца угля с одинаковым составом минеральных включений могут иметь разные индексы хрупкости вследствие разной степени уплотнения, что не учитывается в приведенном соотношении. Рассмотрение только минералогического состава для прогнозирования хрупкости не является точным.

Еще одной важной характеристикой хрупкой горной породы является высокий угол внутреннего трения θ . Увеличение нормального напряжения приводит к уменьшению угла внутреннего трения, за счет чего уменьшается хрупкость горной породы. Согласно Huska and Das [2] хрупкость может быть выражена следующим образом:

$$BI_3 = \sin \theta$$

Результаты оценки индексов хрупкости для угольных пластов Кузбасса приведены на рисунке 1. Как можно заметить, индексы хрупкости угля BI_1 и BI_2 имеют схожую форму и в целом повторяют изменения в содержании витринита в углях разных пластов. Это объясняется тем, что мацералы имеют собственные значения хрупкости. Хрупкость витринита превышает хрупкость инертинита [1], поэтому в блестящих углях обычно образуется сложная система трещин, а в матовых формируется одиночная трещина.

Оценка способности угольных пластов образовывать сеть трещин при проведении гидроразрыва важна при разработке метана угольных пластов. При значениях индекса хрупкости 10-20% в процессе ГРП формируется единственная планарная трещина, а при высоких индексах хрупкости более 40% и больших расходах закачки жидкости разрыва более 6 м³/мин происходит формирование разветвлённой сети трещин с большой суммарной протяженностью [4]. Таким образом, изменение индекса хрупкости пород прямо пропорционально изменению общей длины формируемых трещин. Исходя из значений средней протяженности сети трещин ГРП на продуктивных пластах Кузбасса, приведенных на рисунке 1, можно сделать вывод о соответствии характера их изменения динамике изменения индекса хрупкости, рассчитанного по формуле Рикмана. Следовательно, индексы хрупкости BI_1 более применимы для оценки хрупкости угля при подборе оптимальных параметров проведения ГРП.

Индекс хрупкости, рассчитанный с использованием статических параметров, позволяет более точно оценить хрупкие свойства горного массива. Тем не менее, из-за трудности

определения статических характеристик, можно использовать динамические характеристики для расчета индекса хрупкости вследствие незначительного различия полученных значений.

При полученных индексах хрупкости угля BI_1 , составляющих 0,35 – 0,5, происходит формирование сети трещин, за счет чего значительно увеличивается объем дренируемого коллектора по сравнению с дренируемым объемом одиночной планарной трещины.

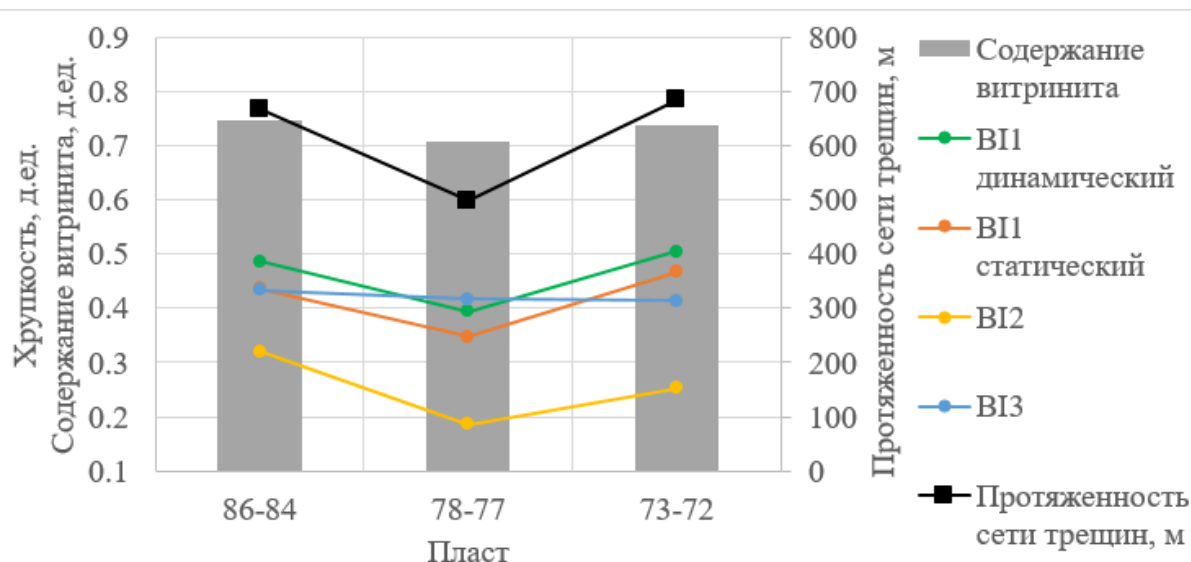


Рисунок 1. Оценка хрупкости углей Кузбасса

Согласно Рикману[4], при полученных значениях хрупкости в качестве жидкости разрыва рекомендуется использовать синтетические полиакрилатные или гибридные жидкости разрыва. Важно отметить, что их вязкость в зависимости от состава может быть достигать до 100 сПз. Увеличению вязкости способствует присутствие в жидкости различных модификаторов (в частности, гелей), которые могут адсорбироваться поверхностью угля. Также при увеличении вязкости жидкости разрыва увеличивается высота трещины, вследствие чего она будет распространяться в непродуктивную часть разреза. Таким образом, вязкость жидкости должна быть достаточно низкой (обычно для угольных коллекторов она не превышает 25 сПз).

Формируемая сеть трещин имеет меньшую степень раскрытости, чем основная трещина. Для крепления вторичных трещин необходимо использовать достаточно мелкий проппант (фракций 40/70, 30/50), который способен в них проникнуть. Оптимальным вариантом является закачка нескольких фракций проппанта: сначала более мелкого, затем более крупного. При этом крупный проппант должен обладать более высокой прочностью, чтобы удерживать в раскрытом состоянии основную трещину, подверженную значительному напряжению в области скважины. Использование закачки нескольких фракций позволяет лучше закрепить созданную трещину (рис. 2).

Так как угольные пласты имеют достаточно высокую хрупкость, давление разрыва пласта для них будет меньше, что облегчает процесс проведения гидроразрыва вследствие меньшей требуемой мощности используемых насосных агрегатов. Данный факт подтверждается результатами проведения гидравлического разрыва пласта при схожих параметрах и примерно на одинаковых глубинах для угольных пластов Кузбасса: пласт 78-77 имеет среднее давление разрыва 33,25 МПа, пласт 86-84 – 30,5 МПа, 73-72 – 30,2 МПа.

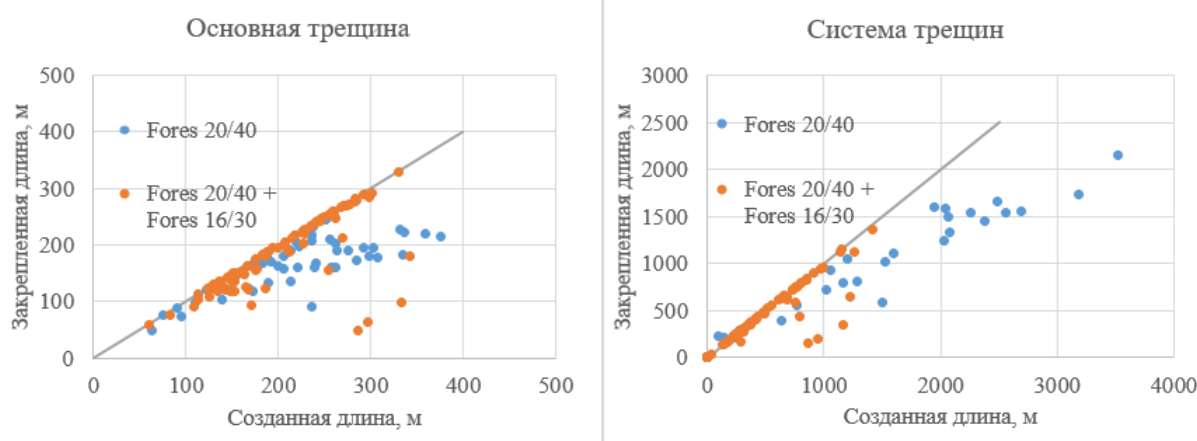


Рисунок 2. Соотношение закрепленной и созданной длины трещины

Выводы

1. Расчет индекса хрупкости угля может быть произведен различными способами – с учетом упругих и прочностных параметров, а также минерального состава. Оценку индекса хрупкости для проектирования гидравлического разрыва пласта следует проводить на основе статических модуля Юнга и коэффициента Пуассона по формуле Рикмана.

2. При индексах хрупкости углей Кузбасса 0,35 – 0,5 при проведении операции гидравлического разрыва пласта следует использовать синтетические полиакрилатные системы или гибридные жидкости разрыва с невысокими вязкостями. Закрепление трещины следует проводить проппантами нескольких фракций: мелкие проппанты необходимо использовать для крепления сети трещин, более крупные и прочные – для крепления основной трещины.

3. Чем выше индекс хрупкости пласта, тем меньшее давление разрыва необходимо для формирования трещины ГРП.

Библиография

1. Fang, X., Wu, C., Gao, B., Zhang, S., Zhou, D., & Jiang, X. (2023). Effects of active hydraulic fracturing fluid on the fracture propagation and structural damage of coal: phenomena and mechanisms. *Natural Resources Research*, 32(4), 1761–1775.
2. Hucka, V.; Das, B. (1974). Brittleness determination of rocks by different methods. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abst.* 1974, 11, 389–392.
3. Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J.-C., & Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs - An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference*.
4. Rickman, R., Mullen, M. J., Petre, J. E., Grieser, W. V., & Kundert, D. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*.
5. Shimizu H, Ito T, Tamagawa T, Tezuka K (2018) A study of the effect of brittleness on hydraulic fracture complexity using a flow-coupled discrete element method. *J Petrol Sci Eng* 160, 372–383.