



УДК 553.9

О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов

Ю.А.КАШНИКОВ, С.Г.АШИХМИН, А.Э.КУХТИНСКИЙ, Д.В.ШУСТОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Представлены результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента трещиностойкости K_{IC} горных пород тремя методами для терригенных и карбонатных объектов. Испытания проведены разными методами в связи с отсутствием в России стандартной методики определения характеристик трещиностойкости для горных пород. В данной работе использовались следующие методики определения коэффициента K_{IC} : растяжение образцов керна с кольцевой трещиной, действие сосредоточенной силы на образец-балку с трещиной и метод изгиба полукруглых образцов с трещиной в соответствии с рекомендациями ISRM.

В работе представлены связи коэффициента трещиностойкости со скоростью продольной волны и пористостью. Полученные зависимости характеризуют общую тенденцию изменения исследуемого параметра и могут быть использованы при проектировании гидравлического разрыва пласта на месторождениях, для которых были проведены испытания.

Ключевые слова: коэффициент трещиностойкости; растяжение; изгиб; терригенные и карбонатные объекты; горные породы

Как цитировать эту статью: О связи коэффициентов трещиностойкости и геофизических характеристик горных пород месторождений углеводородов / Ю.А.Кашников, С.Г.Ашихмин, А.Э.Кухтинский, Д.В.Шустов // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 83-90. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.83

Введение. Все теоретические модели и программное обеспечение для моделирования гидравлического разрыва пласта (ГРП), являющегося основным геотехническим мероприятием, направленным на повышение продуктивности скважин, используют понятия механики трещин и, следовательно, значения коэффициентов трещиностойкости K_{IC} [2, 3, 5].

Определение данного параметра для горных пород продуктивных объектов нефтяных и газовых месторождений практически не проводилось, хотя параметр K_{IC} входит во все сервисные пакеты по моделированию дизайна ГРП. Чаще всего значение коэффициента K_{IC} принимают равным $1 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, причем вне всякой связи с фильтрационно-емкостными и геофизическими характеристиками горных пород. В связи с важностью данного параметра для теоретического обоснования дизайна ГРП представлены результаты лабораторных испытаний по определению значений K_{IC} тремя методами для терригенных и карбонатных объектов и связи данного параметра с геофизическими характеристиками, прежде всего скоростью продольной волны.

В настоящее время в отечественных стандартах отсутствуют методики определения характеристик трещиностойкости горных пород. В то же время имеются методы определения K_{IC} , рекомендованные к использованию Международным обществом по механике горных пород (ISRM). Всего со стороны ISRM в разное время было предложено четыре метода определения статического коэффициента трещиностойкости [8, 10, 11]. Первые два предложены группой ученых в 1988 г. [11]. Первый метод предполагает изгиб цилиндрического керна с пропилом V-образной формы перпендикулярно оси цилиндра. Во втором методе [11] рекомендуется раскрытие специальными захватами короткого цилиндра с V-образным пропилом вдоль оси керна. Третий метод, предложенный в 1995 г. [8], предполагает сжатие цилиндрического образца с V-образным пропилом. Четвертый метод, предложенный в 2013 г. [10], предусматривает изгиб полукруглых образцов с пропилом. Преимущество данного способа перед другими, рекомендованными ISRM, в том, что используется стандартное оборудование, подготовка образцов к испытанию и обработка результатов относительно просты.

При проведении испытаний на трещиностойкость композитов, строительных и других материалов обычно пользуются стандартами, разработанными для металлов и сплавов, в частности ГОСТ 25.506-85. Они, как правило, основаны на определении коэффициента K_{IC} при испытаниях образцов в режиме растяжения или изгиба с исходной усталостной трещиной. Выращивание исходной трещины на образцах из горных пород представляется проблематичным, так как это

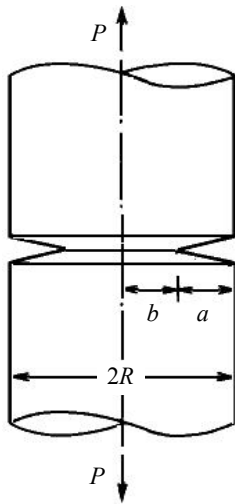


Рис.1. Схема нагружения образца с кольцевой трещиной для определения K_{IC} в соответствии с рекомендациями работы [4]
 P – растягивающая нагрузка;
 R – радиус цилиндра; a – глубина пропила, $a = R - b$; b – минимальный радиус в месте проточки

хрупкий материал, и при попытке прорастивания может происходить неконтролируемый динамический рост трещины, вплоть до разрушения образца.

Как указано в работе [1], испытания горных пород могут быть проведены двумя способами: на прямое растяжение и изгиб. При растяжении желательно использовать образцы в виде тонких пластин с пропилом. Перед испытанием с помощью динамических нагрузок в кончике надпила создается усталостная трещина. Затем производится статическое растяжение образца и определяется разрушающее напряжение, по которому вычисляется K_{IC} .

Как следует из приведенных в работе [1] данных, коэффициенты K_{IC} для горных пород, которыми могут быть представлены продуктивные объекты нефтяных месторождений – песчаники и алевролиты, изменяются в пределах 0,5-1,7 МПа·м^{1/2}.

В рамках данной работы определение коэффициентов K_{IC} выполнялось по трем методикам: растяжением образцов керна с кольцевой трещиной [4], действием сосредоточенной силы на образец-балку с трещиной по методике, аналогичной описанной в работе [1], и методом изгиба полукруглых образцов с трещиной, в соответствии с рекомендациями ISRM [10]. Основной целью проведенных испытаний является не только определение конкретных значений коэффициентов K_{IC} разными методами для месторождений углеводородов, но и установление связи данного параметра с

геофизическими характеристиками горных пород. В мировой литературе уже известны данные исследований [6, 7], однако в отечественной литературе такие исследования не представлены. Известно множество уравнений, связывающих модуль упругости, пределы прочности и другие характеристики с геофизическими параметрами, однако в рамках данной статьи впервые получены статистические зависимости коэффициентов трещиностойкости от геофизических характеристик горных пород.

Определение коэффициентов трещиностойкости на образцах керна цилиндрической формы. Для определения величины K_{IC} исследовались образцы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, изготовленные из керна материала скважины № 118 Енапаевского месторождения ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» из интервала терригенных пород 1538-1541 м. Перед испытаниями для отдельных образцов были определены статические и динамические упругие свойства пород в пластовых условиях.

В опытах на определение K_{IC} использовались цилиндрические образцы с кольцевой выточкой (рис.1).

Испытания на растяжение образцов горных пород проведены на электродинамической двухосевой испытательной системе Instron ElectroPuls E10000. Для испытаний данного типа образцов была разработана и сконструирована специальная оснастка, позволяющая закрепить цилиндрический образец в захватах испытательной машины для проведения испытаний на растяжение.

Испытание на растяжение образца проводилось при комнатной температуре. В испытании задавалась постоянная скорость перемещения захвата испытательной машины, составляющая 0,2 мм/мин.

Коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} был рассчитан по формулам, приведенным в работе [4], для цилиндрического образца с поверхностной кольцевой трещиной при растяжении (обозначения в соответствии с рис.1)

$$K_I = P\sqrt{\pi b} f_1(\alpha) / \pi b^2; \quad (1)$$

$$\alpha = b / R;$$

$$f_1 = 0,5(1 + 0,5\alpha + 0,375\alpha^2 - 0,363\alpha^3 + 0,731\alpha^4)\sqrt{1-\alpha}.$$

Всего по описанной схеме было испытано 25 образцов. Среднее значение K_{IC} составило 0,108 МПа·м^{1/2}, при минимальном и максимальном значениях 0,044 МПа·м^{1/2} и 0,168 МПа·м^{1/2}

соответственно. Прочность на растяжение испытанных образцов изменяется от 0,55 МПа до 2,34 МПа, что соответствует характерным значениям для данного вида пород.

Определение коэффициентов трещиностойкости на образцах-балках.

Определение коэффициентов K_{IC} на образцах-балках выполнялось по схеме, представленной на рис.2. Использовался керновый материал, отобранный с терригенных объектов месторождений Западного Урала (табл.1), представленный аргиллитами, алевролитами и песчаниками, и с карбонатных объектов газоконденсатных месторождений Республики Узбекистан (табл.2), представленный известняками серыми, органогенными, массивными, пористыми, крепкими. В табл.2 приведены средние по месторождениям значения параметров.

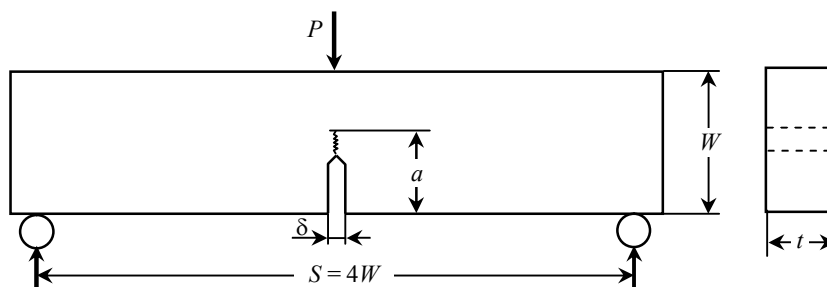


Рис.2. Расчетная схема нагружения образца-балки для определения K_{IC} в соответствии с рекомендациями работы [1]

P – прикладываемая нагрузка; δ – ширина пропила; S – расстояние между опорами; W – высота образца; t – ширина образца; a – глубина пропила

Таблица 1

Характеристики кернового материала для изготовления образцов-балок и коэффициенты K_{IC} нефтяных месторождений Западного Урала

Месторождение	Номер скважины	Количество образцов	Глубина отбора, м	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
Ольховское	164	3	2014,57-2014,72	0,795
Уньвинское	365, 215	8	2221,76-2221,91	0,413
Кокуйское	582	2	1727,43-1727,54	0,462
Софьинское	338	3	2553,25-2553,40	0,380
Викторинское	94	4	1649,31-1649,50	0,969
Средневзвешенное по числу образцов значение				0,604

Таблица 2

Характеристики кернового материала для изготовления образцов-балок и коэффициенты K_{IC} газоконденсатных месторождений Республики Узбекистан

Месторождение	Средняя глубина отбора, м	Количество образцов	Открытая пористость, %	Скорость продольной волны V_p , м/с	Объемная плотность ρ , г/см ³	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
Аккум	2114,17	5	7,74	5117	2,46	1,46
Алат	2238,52	3	13,27	4490	2,35	0,984
Кандым	2167,12	10	6,87	5227	2,33	0,846
Парсанкуль	2173,2	5	2,41	5833	2,41	1,038
Ходжи	2208,18	5	2,54	5814	2,55	1,356
Средневзвешенное по числу образцов значение						1,137

Из каждого кернового монолита было изготовлено 2-8 образцов для месторождений Западного Урала и 3-10 образцов для месторождений Республики Узбекистан. Размеры образца-балки были следующие: $W = 2$ см; $t = 1$ см; $a = (0,3-0,4)W$; $\delta = 0,05W$.

Испытания проведены на испытательной машине Instron 5965 на образцах в форме балки прямоугольного сечения с нанесенной начальной выточкой. Выточка изготавливалась в два этапа. На первом этапе наносился пропил алмазным диском номинальной толщиной 0,6 мм на глубину 6 мм с использованием стола с направляющей. На втором этапе формировалась вершина выточки с использованием двух лезвий различной толщины, предварительно на лезвиях наносились однонаправленные зубцы с шагом 2-4 мм. Полученная длина первичной трещины замерялась с помощью микроскопа.

Значения коэффициентов интенсивности вычислялись по формулам (обозначения в соответствии с рис.2) [4]:



$$K_{IC} = \frac{3SP}{2tW^2} \sqrt{\pi a} F_1(\alpha); \quad (2)$$

$$\alpha = a/W;$$

$$F_1(\alpha) = \frac{1,99 - \alpha(1 - \alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)}{(1 + 2\alpha)(1 - \alpha)^{3/2}}.$$

Полученные данным методом значения K_{IC} для терригенных объектов Западного Урала существенно отличаются от значений, полученных путем растяжения образцов круглой формы с круговой выточкой. Характерно, что даже минимальное значение K_{IC} , определенное по второй методике, существенно превышает максимальное значение K_{IC} , определенное по первой методике. Однако, это может быть связано, как с самой методикой определения данного параметра, так и с характеристиками образцов.

Значения K_{IC} карбонатных объектов газоконденсатных месторождений Республики Узбекистан, определенных по второй методике, оказались в два раза выше значений данного параметра для терригенных объектов Западного Урала, что объясняется различием прочностных свойств. Данный эксперимент не позволяет произвести определение пределов прочности на одноосное сжатие, однако эксперименты на других образцах дают средние значения данного параметра – 40-60 МПа для терригенных объектов Западного Урала и 80-120 МПа для карбонатных объектов месторождений Республики Узбекистан.

Определение коэффициентов трещиностойкости на полукруглых образцах по рекомендациям ISRM. Подготовка образцов для определения K_{IC} по данной методике выполняется следующим образом. Стандартный цилиндрический керн распиливается вдоль продольной оси пополам. При этом отклонение диаметральной плоскости не должно превышать 0,2 мм. Толщина образца B должна составлять $0,8R$. Посередине образца делается пропила длиной a , ширина которого не должна превышать 1,5 мм. Длина должна удовлетворять условию $0,4 \leq a/R \leq 0,6$. Поверхность пропила, расположенная по направлению вдоль оси образца, должна быть плоской с точностью до 0,01 мм. Плоскость пропила не должна отклоняться от перпендикулярного направления к плоскостям по краям образца более чем на $0,5^\circ$. Геометрия подготовленного образца и схема нагружения приведены на рис.3.

Испытание производилось на стандартном оборудовании, предназначенном для испытаний на трехточечный изгиб. Скорость нагрузки не должна превышать 0,2 мм/мин, чтобы исключить динамические эффекты. Точки опор должны располагаться на расстоянии s друг от друга, которое должно удовлетворять условию $0,5 \leq s/2R \leq 0,8$. Диаметр опор должен составлять 5 мм. Направление нагрузки должно совпадать с плоскостью пропила.

После разрушения образца требуется проверка вида его разрушения. Если плоскость образовавшейся трещины отклоняется от плоскости пропила более чем на $0,05D$, то результаты признаются недействительными.

Коэффициент трещиностойкости рассчитывается по формуле (обозначения в соответствии с рис.3)

$$K_{IC} = Y' \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB}, \quad (3)$$

где $Y' = -1,297 + 9,516(s/2R) - (0,47 + 16,457(s/2R))\beta + (1,071 + 34,401(s/2R))\beta^2$; $\beta = a/R$.

Уравнение определяет коэффициент трещиностойкости, вычисленный конечно-элементным методом в условиях плоской деформации [9, 10, 12].

На рис.4 показано положение образца в оснастке перед проведением испытаний. Процесс роста трещин являлся квазиравновесным. В ряде случаев отмечались динамические участки разрушения образца.

Для образцов, изготовленных с целью проведения эксперимента по определению коэффициента трещиностойкости K_{IC} терригенных объектов, были отобраны монолиты размером до 0,5 м.

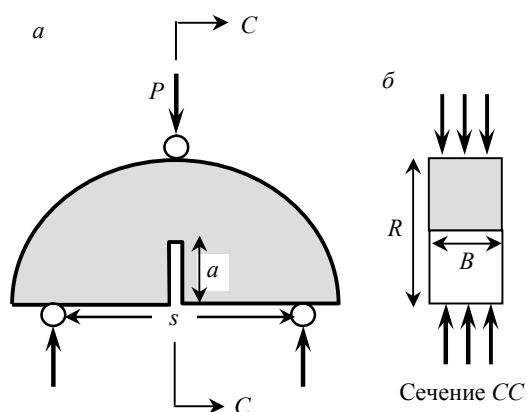


Рис.3. Геометрия образца (а) и схема нагружения (б) в соответствии с рекомендациями ISRM [10]

P – прикладываемая нагрузка; s – расстояние между опорами; a – высота пропила; R – радиус образца; B – ширина образца



Рис.4. Полуциркульный образец в оснастке перед началом испытания

Перед началом проведения экспериментов по определению коэффициента трещиностойкости все образцы экстрагировались, определялись открытая пористость и скорость продольной волны в атмосферных условиях (табл.3).

Таблица 3

Характеристики ядерного материала для изготовления полуциркульных образцов и коэффициенты K_{IC} нефтяных месторождений Западного Урала

Месторождение	Номер скважины	Средняя глубина отбора, м	Количество образцов	Открытая пористость, %	Скорость продольной волны V_p , м/с	K_{IC} , МПа·м ^{1/2}
Дороховское	711	1963,9	15	12,5	4143	1,317
Уньвинское	531	2411,9	14	17,4	3927	0,852
Батырбайское	976	1521,7	12	24,0	3720	0,167
Кокуйское	976	1984,2	16	15,2	4015	0,865
Средневзвешенное по числу образцов значение						0,774

Всего было испытано 57 образцов, 22 образца были отбракованы по критерию отклонения возникшей трещины от плоскости пропила более, чем на $0,05D$. Согласно результатам проведенных испытаний коэффициенты трещиностойкости изменяются в весьма широких пределах: $0,05-1,47$ МПа·м^{1/2} при средневзвешенном по числу образцов видам испытаний $0,774$ МПа·м^{1/2}.

Средние значения коэффициентов K_{IC} , определенные по данной методике, близки, за исключением образцов Батырбайского месторождения, характеризующихся высокой пористостью, к значениям данного параметра, определенным также для терригенных объектов по методике испытаний на образце-балке. Вместе с тем, особенностью является наличие весьма низких значений параметра K_{IC} для высоких значений пористости (24-26 %). Столь низкие значения коэффициента трещиностойкости не отмечались в опытах, описанных в отечественной литературе.

Связь коэффициентов трещиностойкости с геомеханическими и геофизическими характеристиками разреза. Статистические зависимости коэффициентов трещиностойкости горных пород K_{IC} от геомеханических параметров, таких как модуль упругости, предел прочности на сжатие и др. практически не встречаются в научно-технической литературе, что связано, прежде всего, с трудностью одновременного определения параметра трещиностойкости и других геомеханических параметров. В рамках данных исследований на образцах ядра предварительно определялись пористость и скорость продольной волны, а потом уже изготавливались либо образцы-балки, либо полуциркульные образцы, и проводился эксперимент по определению K_{IC} .

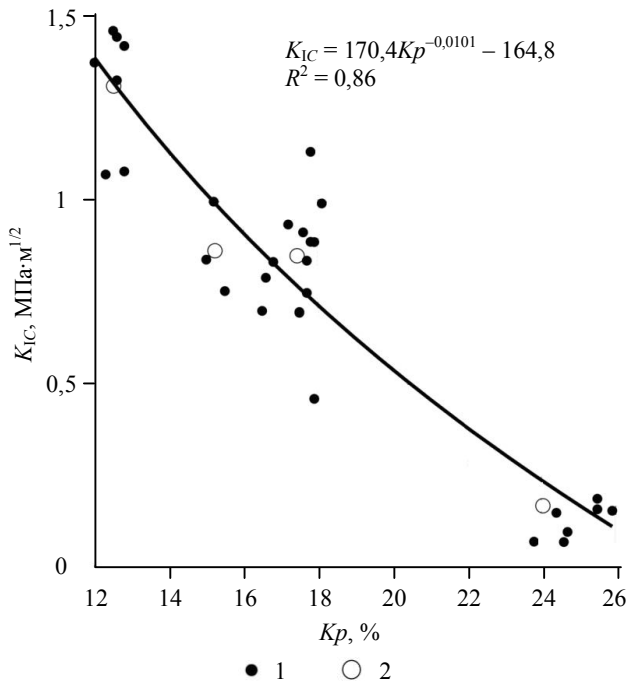


Рис.5. Зависимость коэффициента трещиностойкости K_{IC} терригенных объектов нефтяных месторождений Западного Урала, определенных по стандарту ISRM, от открытой пористости Kp

1 – по образцам; 2 – среднее по месторождениям

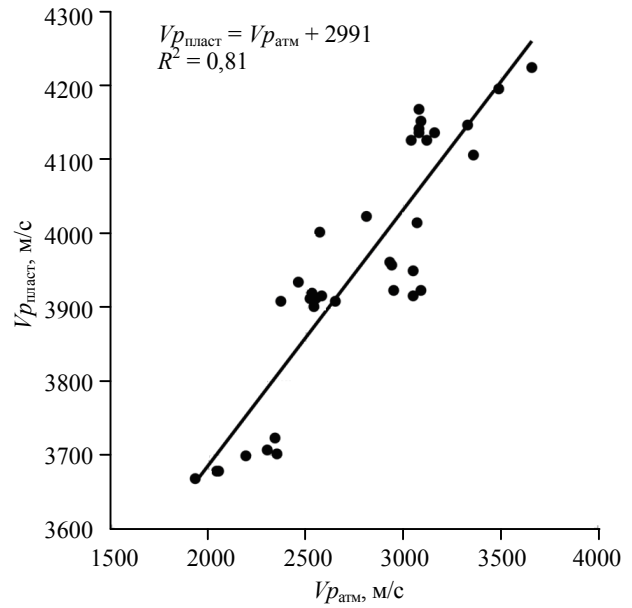


Рис.6. Зависимость скорости продольной волны, определенной в пластовых условиях, $Vp_{\text{пласт}}$ от скорости, определенной в атмосферных условиях, $Vp_{\text{атм}}$

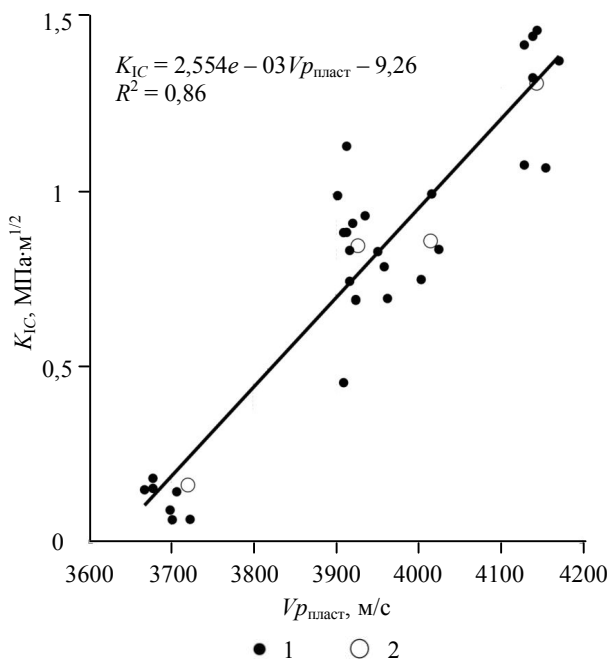


Рис.7. Зависимость коэффициента трещиностойкости K_{IC} терригенных объектов нефтяных месторождений Западного Урала, определенных по стандарту ISRM, от скорости продольной волны в пластовых условиях $Vp_{\text{пласт}}$

1 – по образцам; 2 – среднее по месторождениям

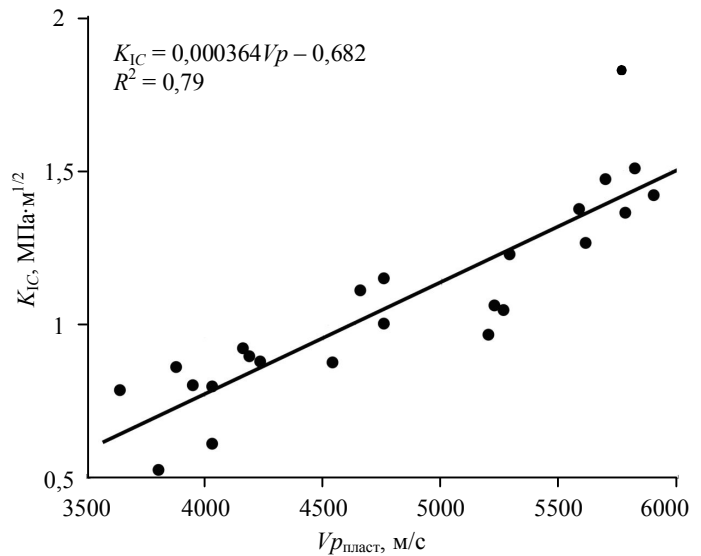


Рис.8. Зависимость коэффициента трещиностойкости K_{IC} образцов карбонатных объектов газоконденсатных месторождений Республики Узбекистан, определенных на образцах-балках [1], от скорости продольной волны в пластовых условиях $Vp_{\text{пласт}}$



Следующим этапом явился анализ зависимости коэффициента трещиностойкости от пористости и скорости продольной волны в пластовых условиях для терригенных объектов Западного Урала. Зависимости для пористости получены как для всей выборки, так и для осредненных значений по монолитам (рис.5). Предварительно для образцов были определены скорость продольной волны и пористость в атмосферных условиях. Однако очевидно, что скорость продольной волны в атмосферных условиях не равна скорости волны в пластовых условиях, в связи с чем требуется переход между данными параметрами. На рис.6 показана связь между скоростью продольной волны, определенной в пластовых условиях, и скоростью волны, определенной в атмосферных условиях, также для терригенных объектов месторождений Западного Урала. На основе данной зависимости была получена связь между коэффициентом трещиностойкости и скоростью продольной волны в пластовых условиях (рис.7).

Особенностью полученных зависимостей является наличие весьма низких значений параметра K_{IC} для высоких значений пористости (24-26 %), которые не отмечались в экспериментах, описанных в отечественной литературе. В то же время определение данного параметра выполнялось ранее преимущественно для скальных массивов, и результаты не увязывались с пористостью или с какими-либо геофизическими факторами.

Для сравнения на рис.8 приведена зависимость коэффициента трещиностойкости от скорости продольной волны, определенной авторами данной работы для карбонатных газоконденсатных объектов месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-Узбекистан Оперейтинг Компани». Параметр K_{IC} был определен по второй методике, т.е. на образцах-балках [1]. Отмечается более надежная зависимость, которая, однако, характеризуется значительно более низким углом наклона к оси Vp .

Заключение. Полученные результаты лабораторных испытаний по определению вязкости разрушения горных пород K_{IC} тремя методами для терригенных и карбонатных объектов показывают его весьма разные значения даже для одних и тех же продуктивных объектов. Однако становится очевидным, что определение данного параметра на образцах керна приводит к заведомо неверному результату – значения коэффициентов трещиностойкости получаются сильно заниженными. Определение параметра K_{IC} на образцах-балках и полукруглых образцах по методу, рекомендованному ISRM, для терригенных объектов месторождений Западного Урала дает приблизительно близкие результаты. Вместе с тем результаты определений по стандарту ISRM дают весьма высокий разброс значений параметра – 0,05-1,47 МПа·м^{1/2} при средневзвешенном по числу образцов и видам испытаний значении 0,774 МПа·м^{1/2}. В целом, авторы данной работы придерживаются метода, рекомендованного ISRM.

Получена связь данного параметра с геофизическими характеристиками продуктивного разреза, прежде всего с пористостью и скоростью продольной волны. Полученные зависимости нельзя признать полностью надежными в силу ограниченного числа испытаний и двух нефтегазодобывающих регионов – терригенных объектов месторождений Западного Урала и карбонатных объектов Республики Узбекистан. Тем не менее, они характеризуют общую тенденцию изменения данного параметра в зависимости от пористости и скорости продольной волны и вполне могут быть использованы при моделировании дизайна ГРП на основе акустического каротажа продуктивного объекта месторождения.

Внедрение разработанной методики определения коэффициентов трещиностойкости на основе корреляционных уравнений планируется на терригенных объектах месторождений ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» и на карбонатных объектах Республики Узбекистан при проектировании дизайна проппантного и кислотного ГРП. При создании базы данных по параметру K_{IC} и зависимости его от геомеханических и геолого-геофизических параметров планируется использование стандарта, рекомендованного ISRM.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баклашов И.В.* Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 271 с.
2. *Браун У.* Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации / У.Браун, Дж.Сроули. М.: Мир, 1972. 247 с.
3. *Партон В.З.* Механика упругопластического разрушения / В.З.Партон, Е.М.Морозов. М.: Наука. 1985. 504 с.
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений / Под ред. Ю.Мураками. В 2-х т. М.: Мир, 1990.



5. *Экономидес М.* Унифицированный дизайн гидроразрыва пласта: от теории к практике / М.Экономидес, Р.Олини, П.Валько. Москва-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2007. 236 с.
6. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks / D.G.Roy, T.N.Singh, J.Kodikara, M.Talukdar // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. P. 1941-1946. DOI: 10.1007/s00603-017-1196-0
7. Determination of rock fracture toughness and its relationship with acoustic velocity / C.Zhixi, C.Mian, J.Yan, H.Rongzun // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 1997. Vol. 34. Iss. 3-4. P. 49.el-49.ell. DOI: 10.1016/s1365-1609(97)00148-2
8. *Fowell R.J.* Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched Brazilian disc (CCNBD) specimens // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1995. Vol. 32. Iss. 1. P. 57-64. DOI: 10.1016/0148-9062(94)00015-U
9. Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 1-mode I / I.L.Lim, I.W.Johnston, S.K.Choi, J.N.Boland // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1994. Vol. 31. Iss. 3. P. 185-197. DOI: 10.1016/0148-9062(94)90464-2
10. ISRM-Suggested Method for Determining the Mode I Static Fracture Toughness Using Semi-Circular Bend Specimen / M.D.Kuruppu, Y.Obara, M.R.Ayatollahi, K.P.Chong, T.Funatsu // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013. Vol. 47. Iss. 1. P. 267-274. DOI: 10.1007/s00603-013-0422-7
11. *Ouchterlony F.* Suggested methods for determining the fracture toughness of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1988. Vol. 25. Iss. 2. P. 71-96.
12. *Tutluoglu L.* Mode I fracture toughness determination with straight notched disk bending method / L.Tutluoglu, C.Keles // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2011. Vol. 48. Iss. 8. P. 1248-1261. DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2011.09.019

Авторы: Ю.А.Кашников, д-р техн. наук, профессор, geotech@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), С.Г.Ашихмин, д-р техн. наук, профессор, geotech@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), А.Э.Кухтинский, ведущий инженер, artuom@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия), Д.В.Шустов, канд. техн. наук, доцент, geotech@pstu.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 31.01.2019.

Статья принята к публикации 21.02.2019.