

Изучение предела прочности на растяжение и трещиностойкости горных пород лабораторными методами

Э.Р. Зиганшин* (ФГАОУ ВО К(П)ФУ), Е.С. Быстров (ФГАОУ ВО К(П)ФУ), С.И. Гильфанов (ФГАОУ ВО К(П)ФУ), М.Г. Маркосян (ФГАОУ ВО К(П)ФУ)

Введение

Испытания kernового материала являются неотъемлемой частью геомеханических испытаний, без которых невозможно построить адекватную модель. Существует множество методик по определению прочностных характеристик породы. На территории Республики Татарстан уже несколько лет ведется активное изучение геомеханических параметров карбонатных пород [1]. Однако, некоторые параметры определить прямым методом довольно сложно. К таким параметрам относятся предел прочности на растяжение и параметр трещиностойкости. Зачастую, эти значения берутся из справочников, без проведения лабораторных испытаний, что может вносить определенные погрешности в результаты вычислений. В данной работе были проведены лабораторные испытания кернa с определением предела прочности на растяжение и трещиностойкости, а также выявлена связь между этими параметрами. Было изучено влияние параметра трещиностойкости на давление распространения трещины в изучаемом интервале.

Объект исследования

Объектом исследования являются образцы горных пород, полученные из нефтяной скважины. Месторождение расположено в западной части Южно-Татарского свода на территории Республики Татарстан. Всего было исследовано 15 образцов каждым из методов. В основном образцы были отобраны из пород-неколлекторов (каширский ярус), а также «пород-покрышек» и перемычек, разделяющих продуктивные слои в верейском горизонте.

Методика исследований

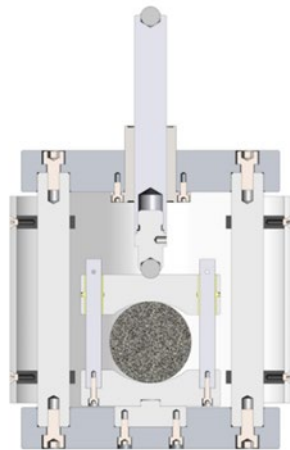
Определение предела прочности на растяжение при раскалывании методом приложения сжимающей нагрузки вдоль диаметра образца в форме диска выполняется согласно требованиям ASTM D3967-08 [2, 4]. Испытания проводятся на образцах в форме диска с отношением толщины к диаметру (t/D) от 0,2 до 0,75. Диаметр образца должен быть не менее 10-кратного линейного размера зерен (неоднородностей), слагающих породу. Дiskoобразный образец помещается в приспособление одноосного растяжения установки ГТЯН.441179.050 и зажимается в радиальном направлении (Рисунок 1 а). Нагрузка увеличивается с заданной скоростью деформации до разрушения образца (например, 0,1 МПа/с).

Расчет для определения предела прочности на растяжение при раскалывании (бразильский тест) осуществляется по формуле (1):

$$\sigma_t = 2P/\pi LD, \quad (1)$$

где: σ_t – предел прочности на растяжение при раскалывании, в МПа, P – максимальная приложенная нагрузка, зафиксированная датчиком силы испытательной машины, в Н, L – толщина образца, в мм, D – диаметр образца, в мм

А)



Б)

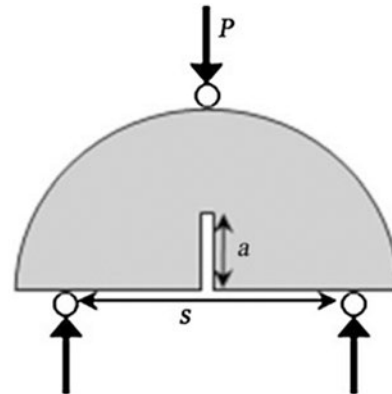


Рисунок 1. А) Приспособление одноосного растяжения установки ГТЯН.441179.050; Б) Схема проведения испытаний на трещиностойкость. P – осевая нагрузка в МПа, a – надрез-инициатор высотой 15 мм, s – расстояние между нижними опорами 40 мм

Исследования трещиностойкости выполнены на образцах полудиска с диаметром 62 мм. Процедура пробоподготовки образца к испытаниям подробно описана в методике [5]. Диаметр образца ($D = 2R$) должен быть связан со средним размером зерна в породе в соотношении не менее 10:1 или должна быть не менее 76 мм и минимальная толщина образца должна быть больше $0.4 D$ или 30 мм. Толщина образца принята 25 мм. Надрез-инициатор трещины выполнен поперек слоистости отрезным алмазным диском толщиной 1 мм, на глубину 15 мм. Торцевые поверхности образцов были отшлифованы с точностью не менее 0.01 мм. Схема расстановки опор, приложения нагрузки и надреза-инициатора показаны на рисунке 1 б.

Расчет для определения величины трещиностойкости осуществлялся по формуле (2):

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

где: K_{Ic} – трещиностойкость, в кПа см^{0.5}, P – максимальная приложенная нагрузка, зафиксированная датчиком силы испытательной машины, в Н; B – толщина образца, в мм; R – радиус образца, в мм; a – длина надреза, в мм; Y – безразмерный коэффициент интенсивности стресса.

Результаты исследований

По результатам испытаний было выявлено, что породы-покрышки между верейскими и каширскими отложениями обладают повышенными прочностными свойствами. Все породы были разделены на две группы. В образцах наблюдается прямая корреляционная зависимость между пределом прочности на растяжение и трещиностойкостью (рисунок 2). Это позволит получить параметр трещиностойкости в тех интервалах, где отобрать большие полудиски затруднительно ввиду плохой сохранности керна.

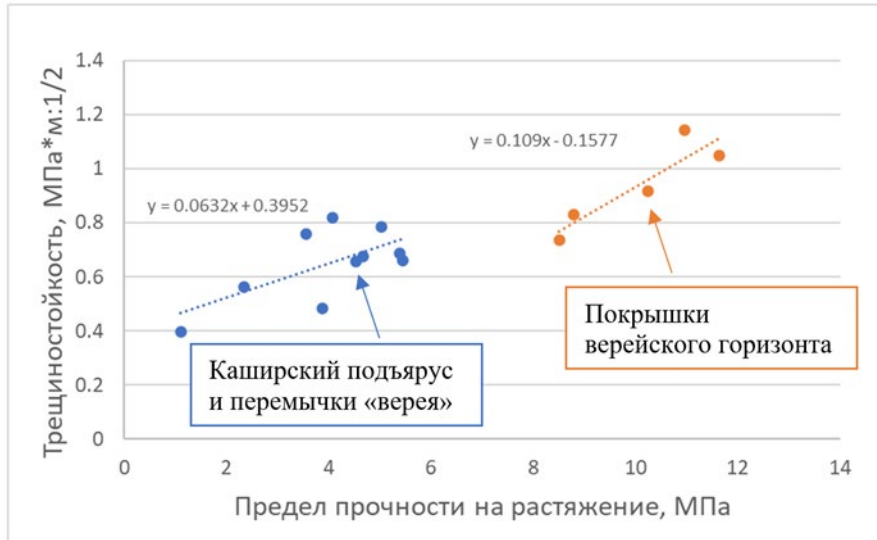


Рисунок 2. График зависимости предела прочности на растяжение и трещиностойкости

Параметр трещиностойкости характеризует способность горной породы сопротивляться распространению трещины, когда начальная трещина уже создана. Знание данного параметра позволяет оценить, насколько «покрышки» и непроницаемые перемычки между коллекторами способны выступать в качестве барьеров распространения трещин ГРП. Причем, существует явная закономерность между изначальной длиной трещины, и давлением, необходимым для дальнейшего её развития [2]. Чем выше длина трещины, тем меньше требуется усилий, чтобы она распространялась далее. Данную зависимость можно выразить уравнением (3):

$$P_b = \frac{K_{IC} - g(a/R_w) \sqrt{\pi a} (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\beta}{\sqrt{\pi a} f(a/R_w)} + \sigma_H (\cos \beta)^2 + \sigma_h (\sin \beta)^2 \quad (3)$$

Где P_b – градиент давления разрыва, K_{IC} – трещиностойкость, a – изначальная длина трещины, R_w – радиус скважины, σ_H , σ_h – соответственно максимальное и минимальное горизонтальное напряжение, β – угол между осью трещины и максимальным горизонтальным напряжением, $g(a/R_w)$ и $f(a/R_w)$ – коэффициенты, значения которых указаны в таблице 1.

Таблица 1

Значения $g(a/R_w)$ и $f(a/R_w)$ для двух симметричных радиальных трещин

a/R_w	$f(a/R_w)$	$g(a/R_w)$	a/R_w	$f(a/R_w)$	$g(a/R_w)$
0	2.26	3.39	0.8	1.43	1.58
0.1	2.06	2.93	1	1.38	1.45
0.2	1.83	2.41	1.5	1.26	1.29
0.3	1.7	2.15	2	1.2	1.21
0.4	1.61	1.96	3	1.13	1.14
0.5	1.57	1.83	5	1.06	1.07
0.6	1.52	1.71	10	1.03	1.03

Все исследуемые образцы были разделены на три группы: породы каширского подъяруса ($K_{IC}=0,75 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), покрышка верейского горизонта ($K_{IC}=1,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) и перемычки в верейском горизонте ($K_{IC}=0,7 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$). И для каждой из групп были построены графики зависимости давления разрыва от длины трещины относительно радиуса скважины (a/R_w) (рис. 3). Было сделано допущение, что трещина распространяется по направлению максимального горизонтального напряжения ($\beta=0$), горизонтальные напряжения равны между собой ($\sigma_H=\sigma_h$).

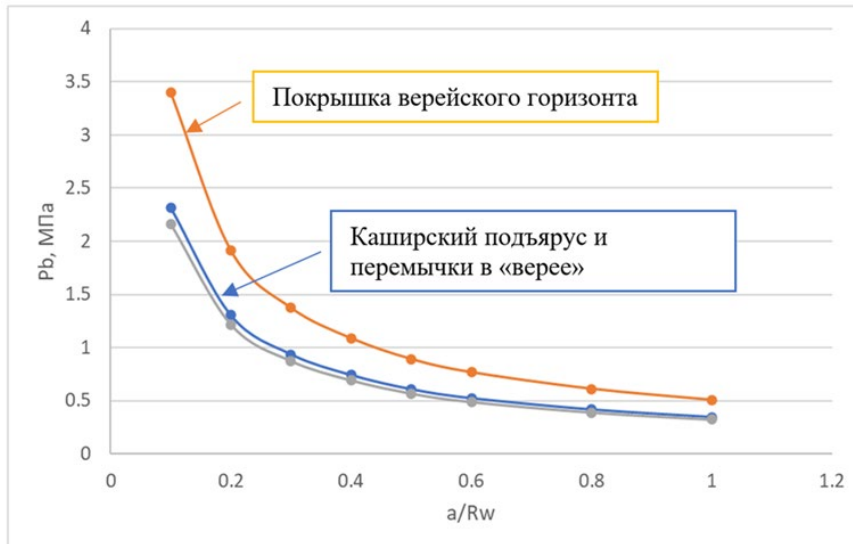


Рисунок 3. Зависимость давления разрыва от начальной длины трещины

На графике видно, что «покрышка» верейского горизонта обладает относительно высокими прочностными свойствами, что может оказывать «барьерный» эффект для проникновения трещины ГРП из верейского горизонта в каширский подъярус. Однако, следует учитывать тот факт, что при увеличении длины трещины, разница между давлением разрыва в разных слоях становится практически одинаковой. Следовательно, основным контролирующим фактором будет контраст горизонтальных напряжений в разных слоях. Это следует учитывать при проектировании гидроразрыва, если есть риск прорыва трещины в водоносные горизонты.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках соглашения № 075-15-2022-299 о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Рациональное освоение запасов жидких углеводородов планеты».

Библиография

1. Зиганшин Э.Р., Нугманов И.И. Результаты изучения петрофизических (упругих) свойств известняков по керну отложений турнейского яруса // 4-я МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИННОВАЦИИ В ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКЕ И ГЕОГРАФИИ-2019». - 2019. - С. 51-53.

References

2. ASTM D3967-08 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens
3. Barry, N., N. R. Whittaker, and S. G. Singh (1992), Rock fracture mechanics principles design and applications, ELSEVIER, Amsterdam-London-New York-Tokyo.
4. Fjaer E, Holt R M, Horsrud P, Raaen A M and Risnes R 1992. Chapter 3 Geological aspects of petroleum related rock mechanics Dev. Petrol. Sci. 33 89–108.
5. The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007–2014 / Ed. R. Ulusay. ISBN 978-3-319-07712-3 DOI 10.1007/978-3-319-07713-0 Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London