

УДК 622.276

**НОВАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАЗРЫВАЕМОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД  
НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА КАРОТАЖНЫХ  
ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФАЦИЙ**

**Чжоу Цяофэн<sup>1,2</sup>, Хэ Фэн<sup>3</sup>, Вей Цзяньгуан<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Ключевая лаборатория формирования и эффективной разработки сланцевых углеводородных ресурсов  
в континентальных отложениях при Министерстве образования КНР,*

*Северо-восточный нефтяной университет,*

*E-mail: zhouxiaofeng@nepu.edu.cn, Хэйлуңцзян, Дацин, 163318, Китай*

<sup>2</sup>*Институт разработки нетрадиционных нефтегазовых ресурсов,*

*Северо-восточный нефтяной университет,*

*Хэйлуңцзян, Дацин, 163318, Китай*

<sup>3</sup>*Отдел разведки и разработки сланцевого газа,*

*ООО “CNPC Chuanqing Drilling Engineering”,*

*г. Чэнду, Сычуань, 610051, Китай*

Представлена новая методика оценки разрываемости горных пород на основе кластерного анализа каротажных петрофизических свойств фаций. Проведен комплексный анализ влияния физических и механических свойств горных пород и данных геофизических исследований скважин (ГИС) на результаты оценки разрываемости. Выполнены эксперименты на установках трехосного сжатия кернов и рассчитаны их коэффициенты хрупкости. Определена первоначальная классификация петрофизических свойств фаций горных пород, по кривым ГИС методом кластерного анализа. По коэффициентам проницаемости и хрупкости предложена методика классификации петрофизических свойств фаций, получен профиль оценки разрываемости горных пород. Практическое применение методики проиллюстрировано по промысловым данным с помощью метода анализа отобранных кернов на примере одного из месторождений КНР. Показано, что коэффициенты разрываемости отобранных из горизонтальной скважины кернов коррелируют с результатами профиля оценки разрываемости.

*Горная порода, разрываемость, кластерный анализ, петрофизические свойства фаций*

DOI: 10.15372/FTPRPI20200510

---

В промышленной практике широко применяется технология бурения горизонтальных скважин с проведением многоступенчатого гидроразрыва пласта для эффективного освоения трудноизвлекаемых запасов нефти и газа [1–3]. Одна из ключевых задач этого процесса — точная оценка разрываемости коллекторов, позволяющая определить интервалы перфорации и разработать оптимальное проектирование схемы многоступенчатого гидроразрыва пласта.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке молодежного научного фонда Северо-восточного нефтяного университета, Китай (грант № 2019QNL-22).

В настоящее время методы для определения коэффициента разрываемости горных пород основаны на расчете индекса хрупкости, вязкости разрушения и т. д. Разрываемость — способность горных пород формировать сложную систему трещин при гидравлическом разрыве пласта, которая зависит от петрофизических и геомеханических свойств этих пород [4].

В [5] представлено более 20 методов для расчета индекса хрупкости горных пород. При обосновании этих методов рассмотрено влияние прочности, твердости и напряженно-деформированного состояния горных пород на индекс хрупкости [6–8], который может различаться при одинаковых пластовых условиях. Использование индекса хрупкости для оценки наиболее проницаемой зоны при проведении гидравлического разрыва пласта не всегда оправданно [9], так как он определяется полуколичественным методом расчета. Результаты оценки разрываемости, основанные на численном моделировании, недостоверны из-за отсутствия экспериментальных данных [4]. Существующие методы оценки разрываемости горных пород имеют множество недостатков, что ограничивает их применение при проектировании гидравлического разрыва пласта. Необходимо определить разрываемость горных пород комплексным подходом, учитывающим геофизические и физико-механические характеристики пласта.

В настоящей работе предложена новая методика оценки разрываемости горных пород на основе кластерного анализа каротажных петрофизических свойств фаций. Физические и механические свойства горных пород и каротажные данные ГИС использованы для оценки разрываемости горных пород. Классификация петрофизических свойств фаций горных пород с помощью данной методики проиллюстрирована по промысловым данным на примере нефтяного месторождения КНР.

#### РАСЧЕТ ИНДЕКСА ХРУПКОСТИ

Ключевое геомеханическое свойство горной породы — индекс хрупкости, характеризующий способность горной породы образовывать трещины при определенных напряжениях [8]. Существуют различные подходы для расчета индекса хрупкости [5]. Так, в [7–9] использована общепринятая формула из [10]:

$$BI = \frac{1}{2} \left( \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + \frac{\gamma - \gamma_{\min}}{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $BI$  — индекс хрупкости, %;  $\gamma$  и  $E$  — статический коэффициент Пуассона и модуль Юнга соответственно;  $\gamma_{\max}$  и  $\gamma_{\min}$ ,  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  — максимальное и минимальное значение коэффициента Пуассона и модуля Юнга соответственно.

Из формулы (1) следует, что чем больше модуль Юнга и коэффициент Пуассона, тем больше индекс хрупкости. Статический модуль Юнга и коэффициент Пуассона определяются на основе данных специальных комплексов ГИС и результатов лабораторных исследований кернов на установках трехосного сжатия.

Используя интервальное время пробега продольной волны, полученное из акустического каротажа скважин, можно рассчитать интервальное время пробега поперечной волны по формуле

$$\Delta t_s = \Delta t_p \left[ 1 - \frac{1.15(\rho^{-1} + \rho^{-3})}{e^{\frac{1}{\rho}}} \right]^{-1.5}, \quad (2)$$

где  $\Delta t_s$ ,  $\Delta t_p$  — интервальное время пробега поперечной и продольной волн соответственно, мкс/м;  $\rho$  — плотность горной породы, г/см<sup>3</sup> [11].

На основе полученных результатов интервального времени пробега продольной и поперечной волн определяется динамический модуль Юнга  $E_d$  (ГПа) и коэффициент Пуассона  $\gamma_d$  по следующим формулам [8]:

$$E_d = 10^6 \frac{\rho}{\Delta t_s^2} \frac{3\Delta t_s^2 - 4\Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}, \quad (3)$$

$$\gamma_d = \frac{0.5\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}{\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2}. \quad (4)$$

Лабораторные исследования кернов выполнены с целью получения корреляционных зависимостей для перехода от динамических упругих свойств к статическим упругим параметрам горных пород. Достаточное количество кернов подбирается на заданной глубине скважины. Керна должны быть типичными и характеризовать геофизические свойства пласта. Затем проводятся испытания для определения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона на установках трехосного сжатия кернов. С учетом результатов лабораторных испытаний кернов и данных акустического каротажа скважины устанавливаются зависимости динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона от статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона. Создаются профили изменения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона по глубине скважины. В настоящей работе индекс хрупкости рассчитывается через статические упругие модули (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) по формуле (1).

#### КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД

Кластерный анализ — задача разбиения заданной выборки объектов на подмножества (кластеры) так, чтобы каждый кластер состоял из схожих объектов, а объекты разных кластеров различались [12]. Задача кластеризации петрофизических свойств фаций горных пород относится к статистической обработке данных специальных комплексов ГИС, включая индекс хрупкости. Цель разбиения по группам специальных комплексов ГИС в данном объекте — установление классификации петрофизических свойств фаций горных пород.

Кластерный анализ для классификации петрофизических свойств фаций горных пород предполагает следующие этапы:

- отбор выборки для кластеризации петрофизических свойств фаций;
- определение множества переменных, по которым будут оцениваться объекты в выборке;
- вычисление меры сходства между объектами;
- использование метода кластерного анализа геофизических и физико-механических параметров для классификации петрофизических свойств фаций горных пород.

Увеличение количества разделенных групп элементов, характеризующихся общим свойством петрофизических свойств фаций, ограничит применение кластеризации фаций для оценки разрываемости горных пород. Объем отобранных выборок (данных специальных комплексов ГИС) может быть скорректирован с целью реализации методики оценки разрываемости горных пород в промысловых условиях.

Использование методики для оценки прочности горных пород проиллюстрировано на примере промысловых данных горизонтальной скважины нефтяного месторождения КНР. Достоверность методики доказана при помощи сравнения ее с результатами анализа отобранных кернов.

В качестве объекта исследования рассмотрена горизонтальная скважина. Испытания для определения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона проведены на установках трехосного сжатия кернов (10 шт.), отобранных из этой скважины. В табл. 1 показаны результаты измерения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

ТАБЛИЦА 1. Результаты измерения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона

Номер керна	Глубина, м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Статический геомеханический параметр	
			Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
1	1885	2.5	21.86	0.243
2	1907	2.49	51.89	0.249
3	1919	2.53	23.15	0.255
4	2047	2.42	20.46	0.257
5	2082	2.47	23.74	0.246
6	2112	2.53	22.57	0.233
7	2127	2.51	25.47	0.202
8	2130	2.57	23.51	0.248
9	2154	2.54	24.32	0.252
10	2155	2.54	25.16	0.311

Интервальное время пробега поперечной волны для кернов из горизонтальной скважины вычислено по формуле (2). На основе рассчитанного интервального времени пробега поперечной и продольной волн, полученных с помощью акустического каротажа скважины, определены динамический модуль Юнга и коэффициент Пуассона по формулам (3) и (4). В табл. 2 приведены результаты расчетов динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

ТАБЛИЦА 2. Результаты расчетов динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона

Номер керна	Глубина, м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Интервальное время пробега волны, мкс/м		Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона
			продольной	поперечной		
1	1885	2.50	226.48	439.95	34.09	0.318
2	1907	2.49	222.26	433.02	35.09	0.321
3	1919	2.53	227.01	437.18	34.82	0.315
4	2047	2.42	233.24	464.26	29.90	0.331
5	2082	2.47	225.63	442.22	33.45	0.324
6	2112	2.53	224.45	432.25	35.62	0.315
7	2127	2.51	222.20	430.38	35.73	0.318
8	2130	2.57	235.03	447.60	33.60	0.310
9	2154	2.54	226.90	435.73	35.16	0.314
10	2155	2.54	231.95	445.43	33.64	0.314

На основе табл. 1 и 2 получены интерполяционные зависимости статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона от динамического модуля Юнга и коэффициента Пуассона соответственно (рис. 1). По кривым ГИС (акустического и плотностного каротажа) и полученным зависимостям определяются профили изменения статического модуля Юнга и коэффициента Пуассона по глубине горизонтальной скважины (рис. 2). По формуле (1) устанавливается индекс хрупкости, профиль которого в горизонтальной скважине также показан на рис. 2.

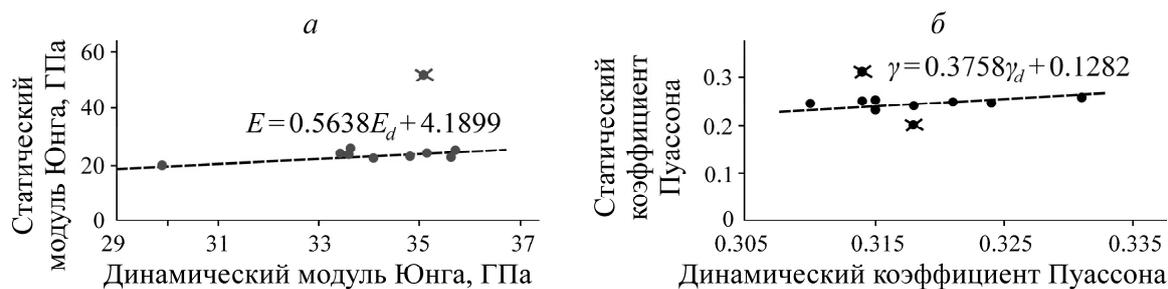


Рис. 1. Зависимость статического модуля Юнга от динамического модуля Юнга (а) и коэффициента Пуассона от динамического коэффициента Пуассона (б)

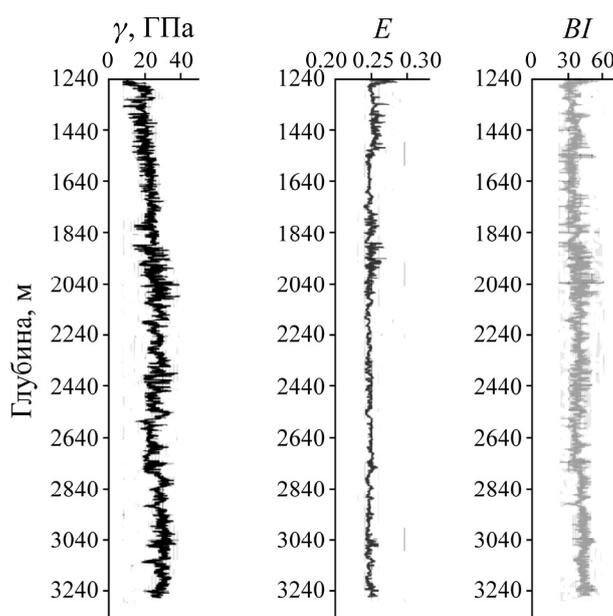


Рис. 2. Профиль изменения статического модуля Юнга  $\gamma$  (а), коэффициента Пуассона  $E$  и индекса хрупкости  $BI$  по глубине, м

### ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ СКВАЖИНА

На основе метода кластерного анализа характеристик кривых ГИС проводилась первоначальная классификация петрофизических свойств фаций горных пород на 13 категорий с использованием следующих параметров: интервального времени пробега волны, индекса хрупкости, удельного электрического сопротивления, плотности, коэффициента проницаемости категорий петрофизических свойств фаций горных пород. При таком количестве категорий горных пород невозможно оценить их разрываемость. Вместе с тем коэффициент проницаемости PERM и индекс хрупкости  $BI$  отражают коллекторские свойства горных пород и могут применяться для классификации петрофизических фаций свойств горных пород в горизонтальной скважине: А — горная порода с высокой хрупкостью и низкой проницаемостью; Б — горная порода с высокой хрупкостью и супернизкой проницаемостью; В — горная порода с низкой хрупкостью и низкой проницаемостью; Г — горная порода с низкой хрупкостью и супернизкой проницаемостью; Д — глина/сланец. Результаты такой классификации петрофизических фаций горных пород представлены на рис. 3. Видно, что категория А соответствует наиболее высокой разрываемости горных пород и является благоприятной зоной для проведения гидравлического разрыва пласта. Категория Д имеет наиболее низкую разрываемость, и в ней не рекомендуется проводить гидравлический разрыв пласта. Результаты оценки разрываемости горных пород показаны в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты оценки разрываемости горных пород

Категория	Коэффициент проницаемости, мД	Индекс хрупкости, %	Результат оценки разрываемости горных пород
А	> 1	> 38	Высокая хрупкость и низкая проницаемость
Б	0.1 ~ 1	> 38	Высокая хрупкость и супернизкая проницаемость
В	> 1	< 38	Низкая хрупкость и низкая проницаемость
Г	0.1 ~ 1	< 38	Низкая хрупкость и супернизкая проницаемость
Д	< 0.1	38 ~ 60	Глина / сланец

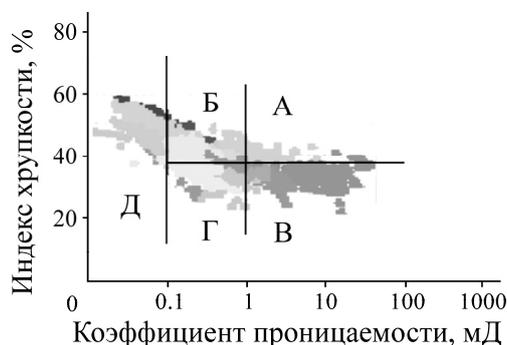


Рис. 3. Классификация петрофизических свойств фаций горных пород по параметрам индекса хрупкости и коэффициента проницаемости

С помощью программного обеспечения Geolog можно получить профиль оценки разрываемости горных пород в горизонтальной скважине (рис. 4).

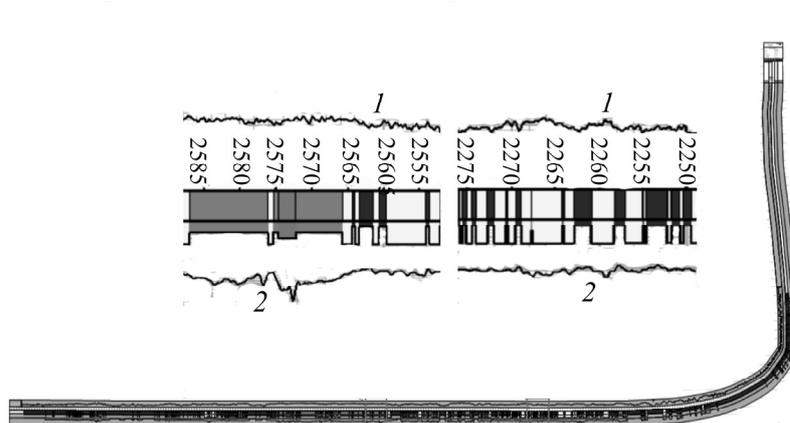


Рис. 4. Профиль оценки разрываемости горных пород в горизонтальной скважине: кривая 1 — гамма-картаж; кривая 2 — коэффициент проницаемости

Оценка применимости предложенной методики в рамках кластерного анализа для оценки разрываемости горных пород выполняется на кернах, отобранных из горизонтальной скважины. На основе коэффициента проницаемости, модуля Юнга и коэффициента Пуассона рассчитан соответствующий индекс хрупкости на разной глубине. По результатам расчетов индекса хрупкости и коэффициента проницаемости определялась категория разрываемости горных по-

род. По профилю оценки разрываемости в горизонтальной скважине можно получить результаты разрываемости кернов на определенных глубинах (рис. 4). Сравнение результатов оценки разрываемости горных пород двумя методами приведено в табл. 4. Видно, что у 6 кернов совпадают измеренный и прогнозный результаты оценки. Для керна № 2 измеренный результат разрываемости (категория Г) отличается от прогнозного (категория Д). Сравнение результатов, полученных двумя методами исследования кернов и кластерного анализа, показало полное совпадение, т. е. предложенная методика может быть использована для оценки разрываемости горных пород на данном участке.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение результатов оценки разрываемости горных пород

Глубина, м	Результат измерения			Результат прогнозирования			Совпадение
	Индекс хрупкости, %	Коэффициент проницаемости, мД	Категория	Индекс хрупкости, %	Коэффициент проницаемости, мД	Категория	
2266	43.25	0.321	Б	40.33	0.211	Б	Да
2269	37.25	0.122	Г	45.35	0.07	Д	Нет
2571	32.56	0.648	Г	33.90	0.597	Г	Да
2572	35.47	0.502	Г	34.51	0.538	Г	Да
2575	34.86	0.315	Г	35.99	0.297	Г	Да
2578	36.98	0.245	Г	37.19	0.228	Г	Да
2583	34.26	0.632	Г	34.32	0.599	Г	Да

### ВЫВОДЫ

Предложена новая методика оценки разрываемости горных пород на основе кластерного анализа каротажных петрофизических свойств фаций. Применимость данной методики проиллюстрирована по промысловым данным ГИС и отобранных кернов на примере месторождения КНР.

Профиль оценки разрываемости горных пород с использованием этой методики коррелируется с результатами исследования кернов. Сравнение результатов, полученных двумя методами исследования кернов и кластерного анализа, показало полное совпадение. Разработанная методика может быть использована для локализации перспективных зон гидроразрыва пласта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чжоу Цяофэн, Золотухин А. Б., Чжан Шичэн Методика определения свойств трещин после проведения многоступенчатого гидроразрыва пласта // Нефт. хоз-во. — 2016. — № 6. — С. 108–111.
2. Zhou X., Zolotukhin A. B., and Gayubov A. T. A new approach to determining multistage hydraulic fracture size by well production data, J. Min. Sci., 2017, Vol. 53, No. 6. — P. 1037–1042.
3. Елкин С. В., Алероев А. А., Веремко Н. А. Модель для расчета дебита горизонтальной скважины в зависимости от числа трещин гидроразрыва пласта // Нефт. хоз-во. — 2016. — № 1. — С. 64–67.

4. **Циу Пин** Разработка методики выбора технологий гидравлического разрыва пласта для добычи сланцевого газа: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.17. — М.: РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2017. — С. 58.
5. **Li Q., Chen M., and Jin Y.** Indoor evaluation method for shale brittleness and improvement, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2012, Vol. 31, No. 8. — P. 1680–1685. (Published in Chinese)
6. **Yuan Junliang, Deng Jingen, and Zhang Dingyu** Fracability evaluation of shale-gas reservoirs, Acta Petrolei Sinica, 2013, Vol. 34, No. 3. — P. 523–527. (Published in Chinese)
7. **Kahraman, S. and Altindag R.** A brittleness index to estimate fracture toughness, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004, Vol. 41, No. 2. — P. 343–348.
8. **Красников А. А., Меликов Р. Ф., Павлов В. А.** Расчет геомеханических свойств пород бажено-абалакского комплекса для прогноза зон трещиноватости // Неф. провинция. — 2018. — № 3(15). — С. 31–43.
9. **Маркин М. А., Гула А. К., Юсупов Я. И.** Комплексный геомеханический подход для выбора интервалов проведения ГРП на примере баженовской свиты в пределах Краснотеннинского свода // Бурение и нефть. — 2016. — № 9. — С. 50–54.
10. **Rickman R., Mullen M. J., and Petre J. E.** 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, 21–24 September, 2008, Denver, Colorado, USA, SPE 115258.
11. **Yang Xiujuan, Zhang Min, and Yan Xiangzhen** Study on acoustic logging — based on rock elasticity parameters, Petroleum Geology and Engineering, 2008, Vol. 22, No. 4. — P. 39–42. (Published in Chinese)
12. **Тюрин А. Г., Зуев И. О.** Кластерный анализ, методы и алгоритмы кластеризации // Вестн. МГТУ МИРЭА. — 2014. — № 2(3). — С. 86–97.

*Поступила в редакцию 24/III 2020*

*После доработки 30/VI 2020*

*Принята к публикации 11/IX 2020*