DOI: https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.170-185
EDN OAZNLR
УДК 622.276.031:550.822.3

Хрупкость горных пород в разрезе Гыданского полуострова Западной Сибири

Кузьмина С.С., Субботин М.Д., Павлюков Н.А.
ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

Brittleness of rocks in the section of the Gydan (Western Siberia)

S.S. Kuzmina, M.D. Subbotin, N.A. Pavlyukov
Tyumen Petroleum Research Center LLC, Tyumen, Russia

E-mail: sskuzmina@tnnc.rosneft.ru

Аннотация. Для вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов с помощью гидравлического разрыва пласта важным является понимание механизма образования трещин при нагружении. Разрушение хрупких пород позволяет сформировать разветвлённую сеть проводящих трещин со значительной площадью контакта, что увеличивает и коэффициент охвата, и индекс продуктивности. Таким образом, предварительная оценка и прогноз хрупкости горных пород по разрезу и по площади коллектора позволяют оптимизировать графики бурения и дизайны ГРП.

В данной статье приведены результаты оценки индекса хрупкости терригенных отложений танопчинской, ахской и малышевской свит севера Западной Сибири. В качестве основного источника информации для расчетов использованы результаты объемного сжатия керна в термобарических условиях (ТБУ). Оценка индексов хрупкости произведена различными методами: на основании минерального состава образцов керна; по данным акустических исследований и упругих модулей; по данным экспериментов с нагружением. Анализ результатов, полученных различными методами, позволил сделать выводы о взаимосвязанности характеристик.

Ключевые слова: *геомеханика, упругие свойства, индекс хрупкости, разрушение, трещиноватость, упругость и пластичность*

Для цитирования: Кузьмина С.С., Субботин М.Д., Павлюков Н.А. Хрупкость горных пород в разрезе Гыданского полуострова Западной Сибири // Нефтяная провинция.-2025.-№3(43).-С. 170-185. - DOI https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.170-185. - EDN OAZNLR

© Кузьмина С.С., Субботин М.Д., Павлюков Н.А., 2025

Abstract. Understanding the mechanism of fracture formation under loading is important for developing hard-to-recover reserves using hydraulic fracturing. The destruction of brittle rocks allows the formation of a branched network of conductive cracks with a significant contact area, which increases both the coverage coefficient and the productivity index. Thus, preliminary assessment and forecast of rock fragility in the section and over the reservoir area allow optimizing drilling schedules and hydraulic fracturing designs. This article presents the results of assessing the brittleness index of terrigenous deposits of the Tanopchinskaya, Akhskaya and Malyshevskaya formations in the north of Western Siberia. The results of volumetric compression of the core under thermobaric conditions (TBC) were used as the main source of information for the calculations. The brittleness indices were assessed using various methods: based on the mineral composition of core samples; according to acoustic studies and elastic moduli; according to loading experiments. Analysis of the results obtained by various methods allowed to draw conclusions about the interrelation of the characteristics.

Key words: *geomechanics, elastic properties, brittleness index, destruction, fracturing, elasticity and plasticity*

For citation: S.S. Kuzmina, M.D. Subbotin, N.A. Pavlyukov Khrupkost gornyh porod v razreze Gydanskogo poluostrova Zapadnoj Sibiri [Brittleness of rocks in the section of the Gydan (Western Siberia)]. Neftyanaya Provintsiya, No. 3(43), 2025. pp. 170-185. DOI https://doi.org/10.25689/NP.2025.3.170-185. EDN OAZNLR (in Russian)

Введение

Современные и перспективные задачи нефтегазовой отрасли во многом связаны с разработкой нетрадиционных коллекторов и освоением трудноизвлекаемых запасов. Основным методом стимуляции низкопроницаемых коллекторов по-прежнему остается гидравлический разрыв пласта (ГРП), позволяющий создать магистральную или сеть проводящих трещин для притока флюида из продуктивного пласта в скважину. Для повышения эффективности разработки низкопроницаемых пластов наиболее предпочтительным является создание сети проводящих трещин, обеспечивающих максимальную площадь контакта с продуктивным пластом.

Оценка хрупкости горных пород позволяет выполнить прогноз характера трещиноватости, образованной вследствие интенсификации добычи

скважины методом ГРП. В более хрупких горных породах ожидается создание сети проводящих трещин, в то время как в горных породах с меньшей хрупкостью (более пластичных) формируется скорее единая магистральная трещина. Горная порода является хрупкой, если при воздействии напряжения она разрушается при малой упругой деформации и практически полностью отсутствующей пластической деформации. Существуют различные методы оценки хрупкости горных пород, которые связаны с анализом диаграмм деформирования («напряжение-деформация»), упруго-прочностных свойств и минерального состава.

Выбор конкретного метода на практике обусловлен спектром задач и наличием исходных данных. Для одномерного моделирования широко используются упругие модули [1], позволяющие выполнить оценку хрупкости горных пород на основе данных ГИС – широкополосного акустического и гамма-гамма плотностного каротажей. При трехмерном моделировании используются подходы, связанные с сейсмическими атрибутами, минеральным составом [2] или с фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС).

Наиболее достоверными источниками данных для оценки хрупкости горных пород являются результаты исследований керна – объемного сжатия керна в ТБУ. При этом основными ограничениями данного метода остаются объем исходных данных, охват результатами целевых интервалов и неопределенность при определении поперечных деформаций и, как следствие, коэффициента Пуассона.

В данной статье рассмотрены результаты лабораторных исследований керна разведочных скважин на территории Гыданского полуострова в интервалах танопчинской, ахской и малышевской свит. На основе экспериментов по объемному сжатию керна в ТБУ рассчитан индекс хрупкости для каждого образца, выполнено сопоставление с результатами расчетов альтернативными методами.

Методы расчета индекса хрупкости на основе анализа диаграмм деформирования

Группа методов, которая предполагает анализ обратимой деформации/энергии на диаграммах деформирования (**Ошибка! Источник ссылки не найден.**). В интервале AB (линейная зависимость) образец горной породы демонстрирует упругое поведение (при снятии напряжения деформации вернутся в начальное состояние). В точке B материал переходит в пластичное состояние – деформации начинают проявлять нелинейное поведение, т.е. при дальнейшем увеличении напряжения материал деформируется необратимо и с увеличением скорости деформации, но при этом не разрушается. В точке C наступает разрушение материала с потерей прочности до остаточных значений (точка D).

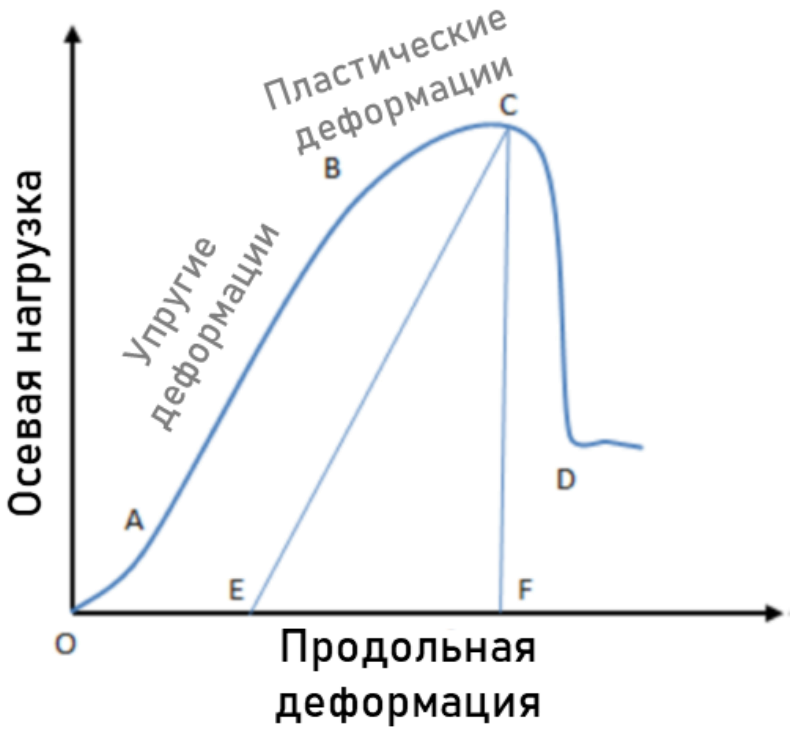


Рис. 1. Типовая диаграмма деформирования образца горной породы

Чем выше хрупкость образца горной породы, тем выше доля упругой деформации или энергии в общей соответствующей величине до момента разрушения образца горной породы:

$$BI_1 = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_o}, \quad (1)$$

$$BI_2 = \frac{W_y}{W_o}, \quad (2)$$

где BI – индекс хрупкости (Brittleness Index),

ε_y – упругая деформация (отрезок EF),

ε_o – общая деформация (отрезок OF),

W_y – упругая энергия при разрушении (площадь EFC),

W_o – общая энергия при разрушении (площадь OABCF).

Далее по тексту данной статьи индекс хрупкости, рассчитанный этим методом, обозначен как «истинный индекс хрупкости», «индекс хрупкости по диаграмме деформирования».

Метод расчета индекса хрупкости на основе упругих модулей

Широко используемый метод расчета индекса хрупкости для целей ГРП, который основан на допущении о том, что особенностью хрупких горных пород являются большая величина модуля Юнга и малая величина коэффициента Пуассона. В общем виде индекс хрупкости [1] определяется как среднее значение между обратно нормированным коэффициентом Пуассона и нормированным модулем Юнга:

$$BI_3 = 0.5\left(\frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}} + \frac{\nu_{max}-\nu}{\nu_{max}-\nu_{min}}\right), \quad (3)$$

где BI – индекс хрупкости,

E – модуль Юнга,

ν –коэффициент Пуассона.

Данный метод может быть использован при расчете индекса хрупкости как по результатам лабораторных исследований керна, так и на основе данных ГИС – широкополосного акустического и гамма-гамма плотностного каротажей. При этом следует отметить, что полученные значения напрямую зависят от интервала нормировки.

Подобная формулировка индекса хрупкости в большей степени характеризуется как критерий выделения благоприятных зон и интервалов для

целей ГРП.

По тексту данной статьи индекс хрупкости, рассчитанный этим методом, будет обозначаться как «индекс хрупкости по упругим модулям».

Методы расчета индекса хрупкости на основе минерального состава

Группа методов, которая основана на анализе минерального состава вещества и базируется на прямой зависимости хрупкости вещества от содержания отдельных элементов. В общем случае более хрупкими элементами выступают кварцевые и карбонатные составляющие, менее хрупкими – глинистые и органические разности.

В литературных источниках [2, 3] приводятся корреляционные зависимости хрупкости и минерального состава для различных типов отложений:

$$BI = \frac{W_{кварц}+W_{пш}+W_{слюда}+W_{кальцит}+W_{доломит}}{W_o}, \quad (4)$$

$$BI = \frac{W_{кварц}}{W_{кварц}+W_{глина}+W_{кальцит}}, \quad (5)$$

где $W_{кварц}$– массовая доля кварца в образце,

$W_{пш}$ – массовая доля полевого шпата в образце,

$W_{слюда}$ – массовая доля слюды в образце,

$W_{кальцит}$ – массовая доля кальцита в образце,

$W_{доломит}$ – массовая доля доломита в образце,

W_o – массовая доля всех минералов в образце,

$W_{глина}$ – массовая доля глины в образце,

В частном случае для конкретных зон и интервалов необходимо выполнять поиск своих регрессионных зависимостей и связей хрупкости с минеральным составом.

Объект и метод исследования

В качестве объекта исследования в данной статье рассмотрены продуктивные отложения, приуроченные к коллекторам малышевской, ахской и танопчинской свит на территории Гыданского полуострова. Малышевская свита сформирована во время регрессионных процессов в условиях прибрежно-континентальных и мелководно-морских обстановок и представлена преимущественно песчаниками и алевролитами. Свита характеризуется постепенной регрессией моря с сокращением объёма глинистых пород в верхней части. Нижнемеловые отложения подразделяются на ахскую и танопчинскую свиты. Отложения ахской свиты сформированы в процессе регрессии и представлены аргиллитоподобными глинами с примесью алевритового материала, верхняя часть разреза опесчанена. Танопчинская свита сформировалась при обмелении бассейна условиях прибрежно-морских и субконтинентальных обстановок и представлена неравномерным чередованием песчаников и серых глин. Лабораторные исследования керна по определению деформационно-прочностных свойств пород при объемном сжатии в ТБУ были выполнены на 115 образцах, из них 85 – экспериментов выполнено на образцах-дублерах при различных эффективных напряжениях для построения паспортов прочности горных пород. По результатам каждого эксперимента определен истинный индекс хрупкости (2) как отношение упругой энергии к общей и индекс хрупкости по упругим модулям (3).

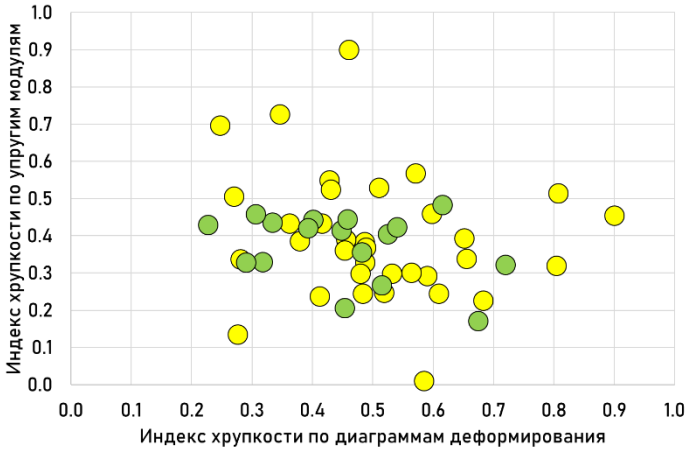
Расчет индекса хрупкости разными методами

Прямое сравнение величин индекса хрупкости, рассчитанных различными методами, имеет ряд ограничений, связанных в первую очередь с различными физическими смыслами, которые лежат в основе каждого метода.

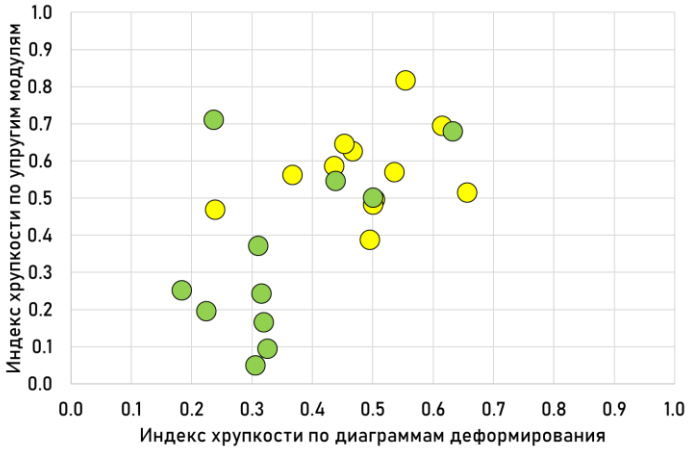
На рисунках ниже (Рис. 2) приведено сравнение индексов хрупкости по диаграммам деформирования и упругим модулям с разделением по свитам и литологии (желтым – коллектор, зеленым - неколлектор). При этом

диапазон нормировки упругих модулей определен для каждого интервала обособленно.

а)



б)



в)

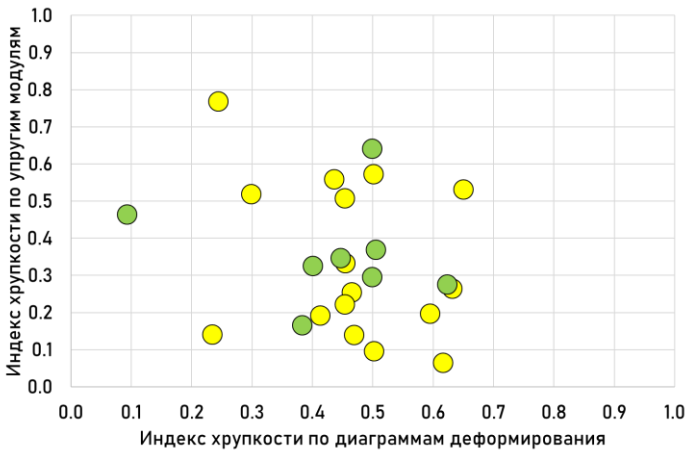
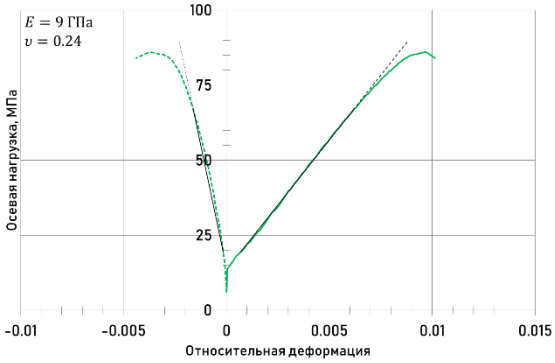


Рис. 2. Сравнение результатов расчета индекса хрупкости различными методами в интервалах танопчинской (а), ахской (б) и малышевской (в) свит

Изначально ожидается, что зависимость между индексами хрупкости, рассчитанными различными методами, должна иметь прямую связь в т.ч. на

качественном уровне: песчаники должны иметь повышенные значения относительно аргиллитов при использовании любого метода. Данная гипотеза подтверждается статистикой по результатам исследований только в интервале ахской свиты (Рис. 2, б). Образцы в интервалах танопчинской и малышевской свит демонстрируют отсутствие связи между двумя методами расчета (Рис. 2, а, в). Исходя из этого можно сделать вывод о том, что большая величина модуля Юнга и малая величина коэффициента Пуассона горных пород не всегда соответствует большему индексу хрупкости. На рисунке ниже (Рис. 3) приведены примеры диаграмм деформирования образцов, демонстрирующих противоречивые результаты использования различных методов определения индекса хрупкости. Образец алевролита согласно методу определения истинной хрупкости, характеризуется индексом 0,74, образец песчаника – 0,31. При этом, используя метод по упругим модулям, индекс для алевролита равен 0,32, для песчаника 0,67 (нормировка модуля Юнга выполнена в диапазоне от 5 до 38 ГПа, коэффициента Пуассона от 0,1 до 0,4).

а) Алевролит крупно-мелкозернистый, глинистый, песчанистый, с агрегатами сидерита, с углефицированным растительным детритом, плотный



б) Песчаник мелко-среднезернистый, алевритистый, с агрегатами сидерита, с углефицированным растительным детритом, плотный

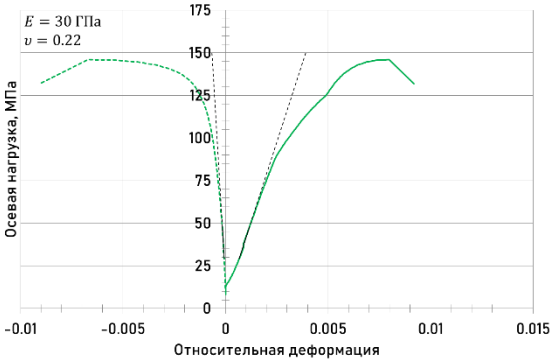
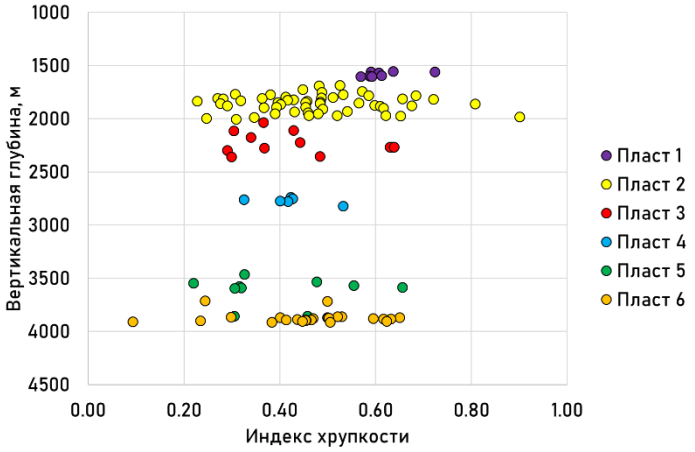


Рис. 3. Пример диаграмм деформирования при разрушении образцов

На рисунках ниже (Рис. 4) приведены результаты расчета индекса хрупкости в зависимости от глубины залегания горных пород. Наиболее хрупкие образцы по диаграммам деформирования приурочены к верхней части разреза (Рис. 4, а) и снижаются с глубиной, но при расчете по упругим

модулям наблюдается обратная тенденция, т.к. с глубиной увеличивается модуль Юнга и снижается коэффициент Пуассона.

а)



б)

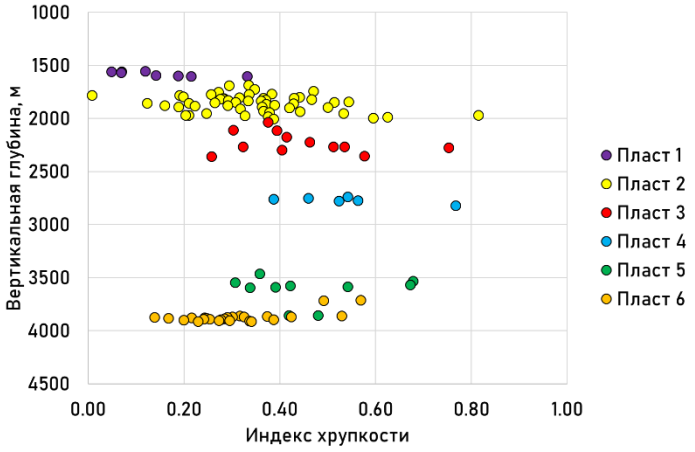


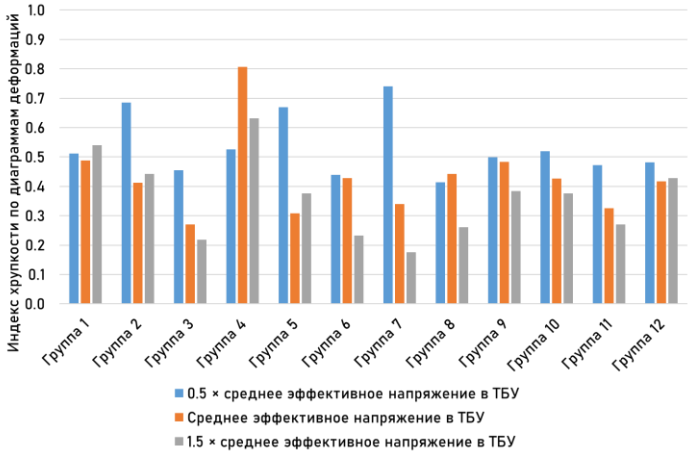
Рис. 4. Зависимость индекса хрупкости по диаграммам деформирования (а) и упругим модулям (б) от глубины

В первую очередь на эту тенденцию влияет эффективное напряжение, воздействующее на матрицу горных пород, которое определяется как разница между вертикальным напряжением и пластовым давлением. Оно возрастает с глубиной и обеспечивает уплотнение пород и изменение упруго-прочностных свойств горных пород.

Наиболее ярко влияние эффективного напряжения на упруго-прочностные свойства горных пород прослеживается при одностадийном объемном сжатии на группах образцов-дублеров. На рисунке ниже (Рис. 5) приведены результаты расчета хрупкости по диаграммам деформирования (Рис. 5, а) и упругим модулям (Рис. 5, б) по группам образцов-дублеров:

голубым цветом приведена величина индекса хрупкости при давлении обжима равном 0,5 от среднего эффективного напряжения в ТБУ; оранжевым – в ТБУ, серым – 1,5 от среднего эффективного напряжения в ТБУ.

а)



б)

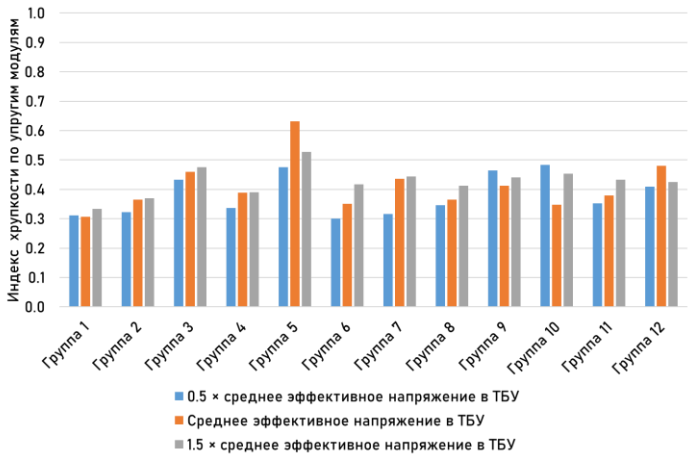


Рис. 5. Индекс хрупкости в зависимости от давления обжима по диаграммам деформирования (а) и упругим модулям (б)

На верхней диаграмме (Рис. 4, а) видно, что в большинстве групп происходит снижение индекса хрупкости с увеличением давления обжима, однако при расчете по упругим модулям (Рис. 4, б) наблюдается противоположный результат: образцы горной породы с увеличением давления обжима становится более жесткими и значения индекса хрупкости увеличиваются. Более детально подобную тенденцию можно наблюдать на совмещенных диаграммах деформирования. В качестве примера на рис. 6 приведены результаты по трех образцам-дублерам (Рис. 3, а) группы 7 (Рис. 5).

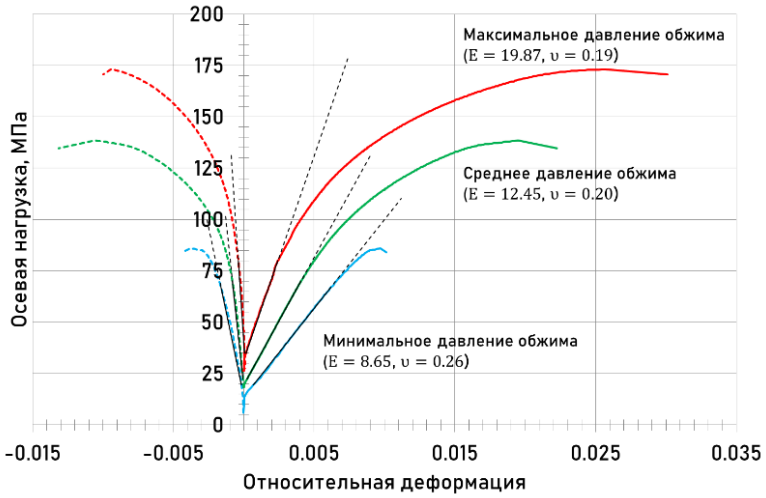
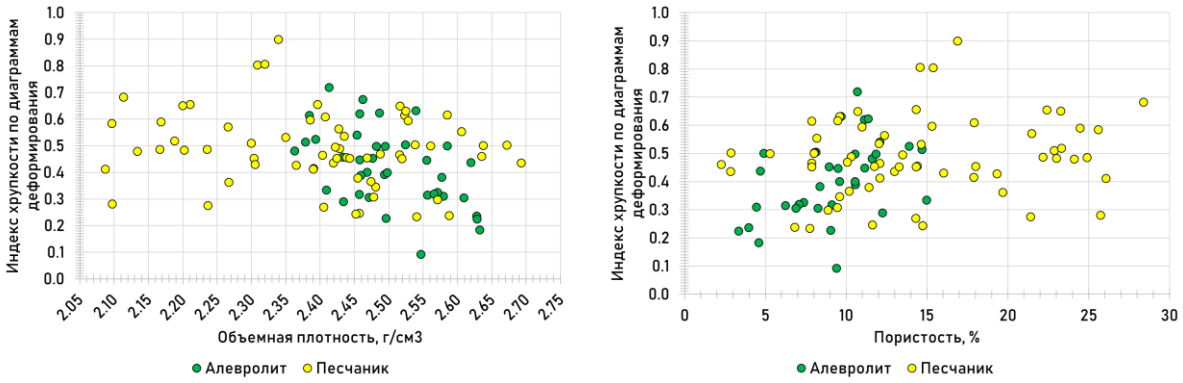


Рис. 6. Совмещенная диаграмма деформирования группы образцов при разном давлении обжима (сплошным – продольная деформация, пунктиром - поперечная)

С увеличением давления обжима увеличивается жесткость и дифференциальная прочность образца, однако линейный участок упругой деформации уменьшается относительно деформации при разрушении, а участок пластических деформаций увеличивается.

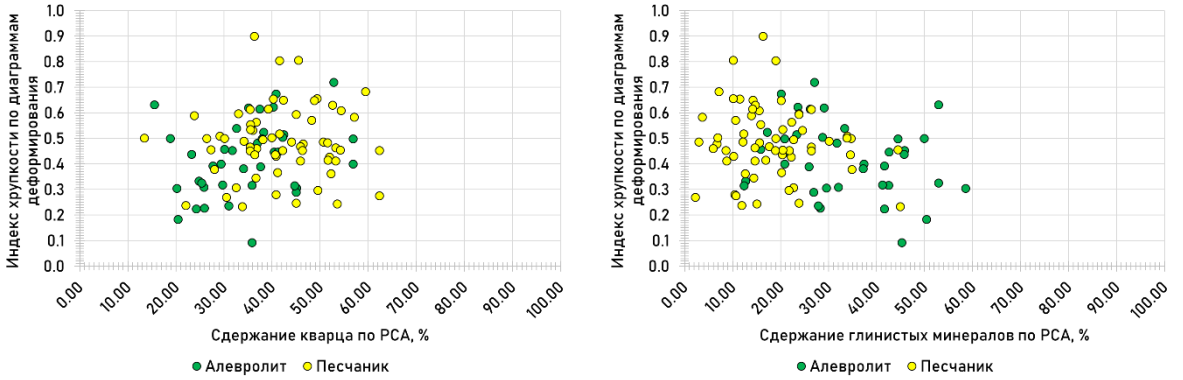
Связь индекса хрупкости с ФЕС, плотностью, минеральным составом

Для определения связи индекса хрупкости с ФЕС, плотностью, минеральным составом горных пород сформирована выборка образцов, вблизи которых выполнены фильтрационные эксперименты и рентгеноструктурный анализ (РСА). На Рис. 7 приведены зависимости индекса хрупкости по диаграммам деформирования от объемной плотности (Рис. 7, а) и пористости образцов (Рис. 7, б), на Рис. 8 – от содержания кварца (Рис. 8, а) и глинистых минералов (Рис. 8, б) по РСА.



а) б)

Рис. 7. Зависимость индекса хрупкости по диаграммам деформирования от объемной плотности (а) и пористости (б) горных пород



а) б)

Рис. 8. Зависимость индекса хрупкости по диаграммам деформирования от содержания кварца (а) и глинистых минералов (б)

На качественном уровне прослеживается прямая связь «хрупкость-пористость» и «хрупкость-содержание кварца» (песчаники с большей пористостью демонстрируют более хрупкое поведение) и обратная связь «хрупкость-плотность» и «хрупкость-содержание глинистых минералов». При этом отдельные образцы с большей степенью карбонатизации (большая плотность и меньшая пористость) ожидаемо демонстрируют большую хрупкость, однако явной связи «хрупкость–содержание карбонатов» по анализируемой выборке не прослеживается.

Заключение

Т.к. оценка индекса хрупкости используется при решении задач, связанных преимущественно со сравнением и ранжированием геологических объектов и/или регионов для целей повышения эффективности разработки методом ГРП, то на практике требуется удобный инструмент, позволяющий выполнить расчет по имеющимся данным. Наиболее широко используемый на практике метод расчета индекса хрупкости через упругие модули имеет неоспоримые преимущества: доступность данных акустического каротажа и понятность физического смысла (выделение благоприятных зон и интервалов для целей ГРП), однако открытым остается вопрос, насколько полученные результаты отражают истинную хрупкость пород, связанную с фактически наблюдаемыми характеристиками разрушения. Сопоставление результатов расчета хрупкости по упругим модулям и по диаграммам деформирования на имеющихся данных выявило отсутствие однозначной связи: не всегда более жесткие породы демонстрируют более хрупкое поведение. В рамках исследуемого терригенного разреза качественная связь прослеживается только для интервала отложений ахской свиты. Можно сделать вывод, что к решению задач оценки истинной хрупкости необходимо подходить индивидуально, с привлечением лабораторных исследований.

Увеличение эффективного напряжения с глубиной приводит к увеличению жесткости массива горных пород и увеличению благоприятных условий для проведения ГРП, но при этом результаты экспериментов по объемному сжатию свидетельствуют об обратной связи эффективного напряжения с истинной хрупкостью. Т.е. при близком минеральном составе ожидается, что порода будет более хрупкая на меньших глубинах. Данная гипотеза также подтверждается результатами сопоставления хрупкости с пористостью и плотностью: более плотные менее пористые горные породы демонстрируют более пластичное поведение при внешней нагрузке.

Выявленные связи истинной хрупкости с основными компонентами

минерального состава (содержание кварца и глинистых минералов) позволяют использовать минеральные модели для множественного регрессионного анализа истинной хрупкости от основных компонентов горных пород.

Список литературы

1. Rickman, R., M. Mullen, E. Petre, B. Grieser, и D. Kundert. «SPE 115258: 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. Denver, 2008. DOI:10.2118/115258--MS
2. Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., and Pollastro, R. M. «Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment» AAPG Bulletin v. 91. 2007. pp. 475 – 499. DOI:10.1306/12190606068
3. Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J.-C., & Zhang, B. «Fracability Evaluation in Shale Reservoirs - An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. SPE 168589» SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. 2014. DOI: 10.2118/168589-MS

References

1. Rickman, R., M. Mullen, E. Petre, B. Grieser, и D. Kundert. «SPE 115258: 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. Denver, 2008. DOI:10.2118/115258--MS (in English)
2. Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., and Pollastro, R. M. «Unconventional shale-gas systems: the Mississippian Barnett Shale of North-Central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment» AAPG Bulletin v. 91. 2007. pp. 475 – 499. DOI:10.1306/12190606068 (in English)
3. Jin, X., Shah, S. N., Roegiers, J.-C., & Zhang, B. «Fracability Evaluation in Shale Reservoirs - An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. SPE 168589» SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference. 2014. DOI: 10.2118/168589-MS (in English)

Сведения об авторах

Кузьмина Светлана Сергеевна, менеджер, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625000, Тюмень, Главпочтамт, а/я 747
E-mail: sskuzmina@tnnc.rosneft.ru

Субботин Михаил Дмитриевич, менеджер, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625000, Тюмень, Главпочтамт, а/я 747
E-mail: mdsubbotin@tnnc.rosneft.ru

Павлюков Николай Алексеевич, начальник отдела, ООО «Тюменский нефтяной научный центр»
Россия, 625000, Тюмень, Главпочтамт, а/я 747
E-mail: napavlyukov@tnnc.rosneft.ru

Authors

S.S. Kuzmina, Manager, Tyumen Petroleum Research Center LLC
747, PO box, Tyumen, 625000, Russian Federation
E-mail: sskuzmina@tnnc.rosneft.ru

M.D. Subbotin, Manager, Tyumen Petroleum Research Center LLC
747, PO box, Tyumen, 625000, Russian Federation
E-mail: mdsubbotin@tnnc.rosneft.ru

N.A. Pavlyukov, Division head, Tyumen Petroleum Research Center LLC
747, PO box, Tyumen, 625000, Russian Federation
E-mail: napavlyukov@tnnc.rosneft.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2025
Принята к публикации 16.09.2025
Опубликована 30.09.2025