

Методологические особенности применения склерометрических и дюрометрических способов исследования керна

И.Н. Степанкин¹, к.т.н.,
А.В. Халецкий²,
Р.Е. Гутман¹,
В.М. Ткачев³

¹БелНИПИнефть

²НГДУ «Речицанефть»

³Институт повышения квалификации и переподготовки ГГТУ им. П.О. Сухого

Адреса для связи: i.stepankin@beloil.by
a.haletsky@beloil.by
r.gutman@beloil.by
vmtkachev@gstu.by

Ключевые слова: геомеханика, исследование керна, предел прочности при одноосном сжатии, Scratch Test, индентирование

Целью работы являлась отработка методологии новых способов исследования кернового материала на основе принципов склерометрического и дюрометрического воздействия на горную породу.

Методика исследований включала скрейчирование на установке Scratch Test, индентирование циклическим вдавливанием индентора, а также одноосное сжатие на установке для исследования прочностных свойств керна RTR-1000.

Суть работы заключается в многократном механическом воздействии на испытываемый материал путем царапания, а также вдавливания твердого инструмента заданной формы с целью регистрации механических реакций горной породы и их последующей интерпретации для расчета предела прочности при одноосном сжатии (UCS).

Работа отличается оригинальным подходом к интерпретации телеметрических данных результатов скрейчирования и индентирования. Определяемые значения прочности коррелируют с результатами испытаний стандартными способами лабораторных образцов, изготовленных из тампонажного цемента. Методика защищена патентами Республики Беларусь и Российской Федерации.

Оценка прочностных показателей скрейчированием осуществляется на образцах керна диаметром от 45 до 120 мм. Для испытаний индентированием подходят как полномерные образцы, так и мелкоразмерные частицы бурового шлама размером от 3 мм.

Практическое значение новых методов заключается в

Methodological features of using sclerometric and durometric methods for core research

I.N. Stepankin
A.V. Khaletsky
R.E. Gutman
V.M. Tkachev

E-mail: i.stepankin@beloil.by
a.haletsky@beloil.by
r.gutman@beloil.by
vmtkachev@gstu.by

Keywords: geomechanics, core research, uniaxial compressive strength, Scratch Test, indentation

The aim of the work was to develop a methodology for new methods of studying core material based on the principles of sclerometric and durometric impact on rocks.

The test procedure included scratching tests, cyclic indentation of an indenter, and uniaxial compression on an RTR-1000 unit for investigating the strength properties of a core samples.

The content of the work consists in repeated mechanical action on the test material by scratching, as well as indentation of a solid tool of a given shape in order to register the mechanical reactions of the rock and their subsequent interpretation to calculate the ultimate strength in uniaxial compression (UCS).

The work is distinguished by an original approach to the interpretation of telemetric data from the results of scratching and indentation. The determined values of strength correlate with the results of standard mechanical tests conducted on the cement samples. The technique is protected by patents of the Republic of Belarus and the Russian Federation.

Evaluation of strength indicators by scratching is carried out on core samples with a diameter of 45 to 120 mm. For indentation testing, both full-size samples and small-sized drill cuttings with sizes from 3 mm are suitable.

The practical significance of the new methods lies in the possibility of organizing an express analysis of the rock strength characteristics with obtaining data that correlate

возможности организации экспресс-анализа прочностных характеристик горных пород с получением данных, коррелирующих с результатами стандартных испытаний. Возможность многократного испытания одного и того же образца без разрушения позволяет получать статистически опосредованную выборку экспериментальных данных с доверительными интервалами, удовлетворяющими значениям коэффициента Стьюдента 0,9 и более.

Комплексный подход к определению характеристик образцов горных пород, основанный на сравнительном анализе данных стандартной методики на одноосное сжатие и инновационных способов неразрушающего контроля, обеспечивает оперативно формирование базы данных свойств пород литологического разреза с целью последующего построения геомеханических моделей месторождений.

with standard tests. The possibility of repeated testing on the same sample without destruction allows obtaining a statistically mediated sample of experimental data with confidence intervals satisfying the values of the Student's coefficient of 0.9 and more.

An integrated approach of determining the rock samples characteristics, based on a comparative analysis of the standard technique for uniaxial compression and innovative methods of non-destructive testing, makes it possible to quickly generate a database of properties of the lithological section for the subsequent construction of geomechanical models.

Введение

Прочность на одноосное сжатие (*UCS*) – один из важных показателей горных пород, используемых для различных расчетных алгоритмов при строительстве нефтяных и газовых скважин. Ее определение традиционным способом стандартизировано в отношении использования образцов керна, их подготовки, испытаний и статистической обработки результатов. [1] Результативность испытаний во многом определяется степенью анизотропии горной породы, которая, как правило, характеризуется определенным градиентом свойств и строения в рассматриваемом интервале. Пористость и трещиноватость различных литологических разностей оказывают существенное влияние на дисперсию результатов испытаний стандартных образцов. Обычно исследуют образец размером 30×60 мм. Довольно часто в нем присутствуют макродефекты в виде трещин и каверн, снижающие прочность образца в целом. Выбуривание образцов в различных точках керна фактически является подготовкой нового образца, структура которого не может быть абсолютно идентичной структуре предыдущего. Вследствие этого выборка результатов испытаний часто не отвечает требованиям статистики.

Альтернативные методики определения прочностных характеристик горных пород, основанные на многократном испытании одного и того же образца, обеспечивают хорошую повторяемость реакции материала. За счет незначительного повреждения испытываемой поверхности область применения таких способов приближается к неразрушающим методам контроля. При этом физическая сущность взаимодействия с породой сохраняет

преимущества прямого контактного обмена реакциями между исследуемым образцом и лабораторным оборудованием.

Два альтернативных механических способа испытаний заслуживают особого внимания. Они основаны на склерометрическом и дюрометрическом воздействиях на испытываемый образец. В первом случае испытания проводят на установках Scratch Test [2, 3]. Их результативность во многом обусловлена конструкцией и состоянием применяемого оборудования, а интерпретация результатов зависит от степени износа режущего инструмента, его погружения породу и собственно свойств самой породы.

Дюрометрический метод реализуется путем внедрения в образец твердого штампа и по своей физической сущности представляет собой индентирование. Его теоретическое обоснование впервые предложено Генрихом Герцем [4]. Методики, адаптированные к особенностям структуры и свойств горных пород, разработаны для пластичных пород (способ Е.Ф. Эпштейна-Г.Франсена) и материалов, обладающих достаточно широким диапазоном свойств, имеющих повышенную прочность (способ Л.А. Шрейнера) [5]. Оригинальное использование метода предложено авторами статьи. Оно предполагает сопоставление реакций горной породы на стадии нагружения и разгружения породы индентором [6, 7].

В работе представлены сравнительные результаты исследований, проведенных посредством индентирования и скрэйчирования в отношении керамических образцов, изготовленных из тампонажного цемента. Основная цель заключалась в выявлении корреляции между данными двух новых способов диагностики горных пород и традиционных испытаний на одноосное сжатие.

Объекты и методики исследований

Для испытаний были подготовлены образцы из тампонажного цемента, при строительстве скважин, применяемого по ГОСТ 1581-96. Состав цемента портландцемент ПЦТ I-G-CC-1, вода пресная, водоцементное отношение 0,44. Размер образцов 40x80 мм. При проведении скрэйчирования использовали лабораторную установку, способную обрабатывать керн общей длиной до 500 мм диаметрами 45-120 мм (см. рис. 1а). Для индентирования применяли оригинальные приспособления для крепления наконечника из твердого сплава ВК8 с рабочей поверхностью, идентичной пирамиде Виккерса. Нагружение образцов осуществляли на прессе, снабженном

термокамерой (см. рис. 1.б). Методика испытаний основана на циклическом вдавливании индентора с дискретным возрастанием максимальной нагрузки в каждом последующем цикле нагружения.

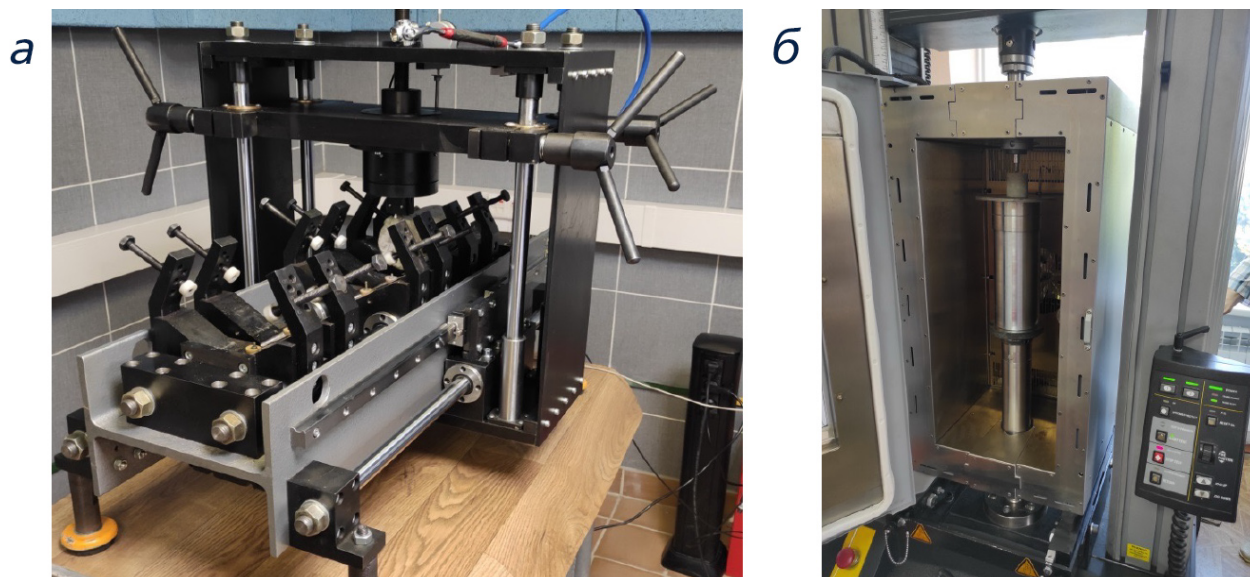


Рис. 1. Общий вид оборудования, примененного для исследования керна:
а – установка Scratch Test; б – компоновка оборудования для индентирования

Стандартные испытания по определению прочности при одноосном сжатии проводили на установке для исследования прочностных свойств керна RTR-1000.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анализ современных подходов к интерпретации результатов скрейчирования основан на принципах, изложенных в работах [8-10]. Принципиальная схема первой лабораторной установки для проведения тестирования путем царапания (резания) горных пород, предложена в работе [10]. Она используется с 1996 г., не претерпевая существенных изменений при ее усовершенствовании другими исследователями. Модернизация установок не затрагивала исходного подхода к исследованию. Он заключается в регистрации горизонтальной и вертикальной составляющих сил реакции испытываемой породы при срезании с нее определенного слоя высокотвердым инструментом и несколько отличается от традиционной схемы склерометрии, применяющейся при исследованиях в классическом материаловедении [11-13]. Основные трудности скрейчирования связаны с износом режущего инструмента. Эта особенность использована для нормативного определения сил трения и дополнительного расчета угла внутреннего трения [2]. При этом разночтения в выборе исходных

данных для расчета предела прочности при одноосном сжатии сохранились до настоящего времени. Среди вариантов интерпретации получаемого сигнала первоначальный подход предполагал использование пиковых значений продольной силы на записанной кривой скрейчирования для расчета показателя UCS по следующей зависимости:

$$UCS = F_t / wd, \quad (1)$$

где F_t – усредненная величина пиковых значений продольной компоненты силы резания [2]; w – ширина резца, мм; d – глубина резания, мм

Зависимость (1) характеризуется удовлетворительной точностью при условии, что реализуется так называемый «пластический» режим резания, т.е. весь объем удаляемого материала, подвергается деструктуризации на уровне разрушения цементных связей между отдельными зернами. Отмеченная особенность зарегистрирована при испытании песчаников с глубиной скрейчирования от 0,2 до 0,7 мм. Для таких условий обосновано дополнительное уточнение зависимости (1): величину F_t предлагается определять как среднее значение продольной силы на всей длине скрейчирования. Авторы работ [2, 3, 8-10, 14], предлагают определять не только предел прочности при одноосном сжатии, но и модуль упругости, критический коэффициент интенсивности напряжений (коэффициент трещиностойкости), а также угол внутреннего трения. Для их расчета требуется углубленный анализ полученных профилограмм с учетом некоторых ограничений. В частности, одно из них касается соотношения между вертикальной и продольной компонентами полной силы резания F_n/F_t при использовании острого резца. Как следует из работы [2], это соотношение обычно сохраняется на уровне 0,6 с доверительным интервалом 0,4 - 0,8 при доверительной вероятности не ниже 90 %. Указанное соотношение, представляет собой маркер притупления рабочей части резца, может изменяться вследствие дополнительного проявления силы трения на задней поверхности резца. С одной стороны, это переводит эксперимент в режим исследований, позволяющих определять силу трения и, следовательно, углом внутреннего трения, с другой, неконтролируемое увеличение размера площадки трения не позволяет точно разделять полученную

информацию по количественным параметрам – резанию и трению. Кроме того, достаточно большой доверительный интервал 0,4 - 0,8 свидетельствует, о том, что авторы допускают широкие колебания по направлению результирующей силы. При этом физическая сущность механизма разрушения горной породы в пограничных областях интервала (0,4 - 0,8) не рассматривается.

Комплексный учет вертикальной и горизонтальной составляющих силы сопротивления резанию предложен в работе [3]. Предел прочности при одноосном сжатии рассчитывается по формуле:

$$UCS = k (F_t - \mu F_n) / (w (d - \alpha F_n)),$$

(2)

где F_t – продольная компонента усилия, Н; F_n – вертикальная компонента усилия, Н; μ – коэффициент трения резца по породе; w – ширина резца, мм; d – глубина резания, мм; α – вертикальная податливость измерительной системы, мм/Н; k – константа пропорциональности.

По мнению авторов, использование зависимости (2) имеет ряд неопределенностей, которые могут быть нивелированы следующим образом. Во-первых, вертикальная податливость нагружающей системы установки α достаточно незначительно влияет на окончательный результат, если нагружающие узлы изготовлены достаточно жесткими и имеют $\varepsilon \leq 10^{-5}$ мм/Н.

Во-вторых, вычитание силы трения в числителе формулы является обоснованным действием при использовании резца с контролируемой площадкой трения на задней поверхности. В противном случае рационально использовать острый резец для однозначного определения предела прочности породы и не учитывать силу трения при его расчетах [2].

В настоящей работе для экспериментальных исследований применяли резцы, изготовленные из твердого сплава ВК-8 с радиусом закругления режущей кромки не более 0,02 мм. Исходя из анализа собственных результатов показатель $\zeta = F_n / F_t$ при использовании острого резца не является постоянной величиной, отражающей наклон суммарной силы, действующей на переднюю поверхность резца. При регистрации результатов испытаний на одном образце керна величины

вертикального F_n и продольного F_t усилий могут существенно изменяться, превосходя друг друга или достигая равенства. По мнению авторов, это обусловлено влиянием неоднородности реальной горной породы, обусловленной как широким разбросом дисперсности отдельных частиц, так и наличием разнородных включений или даже крупных пустот.

Приведенные выше факторы показывают, что использование острого резца без выраженной полоски трибологического контакта на задней поверхности позволит сосредоточиться на оценке прочностных показателей породы при скрэйчировании. При этом для упрощения эксперимента принято предположение, что геометрическая сумма сил между вертикальной и продольной составляющими, регистрируемыми тензометрическим преобразователем оригинальной установки, будет отражать полную реакцию породы на процесс разрушающего внедрения в нее рабочего инструмента с целью полного разрушения заданного слоя. Тогда отношение равнодействующей силы к площади контакта между передней поверхностью резца и удаляемым слоем породы в первом приближении можно считать напряжением разрушения испытываемой породы и придавать этой величине статус предела прочности, при условии, что испытываемый материал отличается высокой степенью однородности.

Эксперименты по испытанию скрэйчированием образцов из тампонажного цемента проводили с использованием резцов с рабочей частью шириной 6 или 8 мм. Это позволило ограничить эксплуатационные нагрузки на узлы экспериментальной установки и зарегистрировать максимально точные реакции испытываемого материала потери конструкционной жесткости.

Результаты исследований регистрировали в виде профилограмм, отражающих вертикальную F_n и продольную F_t составляющие нормальной силы резания F_N . Программное обеспечение также позволяет в режиме прямой регистрации строить кривую изменения нормального напряжения (σ_N) на передней поверхности резца. Как видно из рис. 2, несмотря на выраженную зубчатость силовых показателей при глубине скрэйчирования 0,61 мм, кривая, отражающая изменение нормального напряжения, возникающего на передней поверхности резца, имеет достаточно компактный вид с точки зрения амплитудно-частотного распределения.

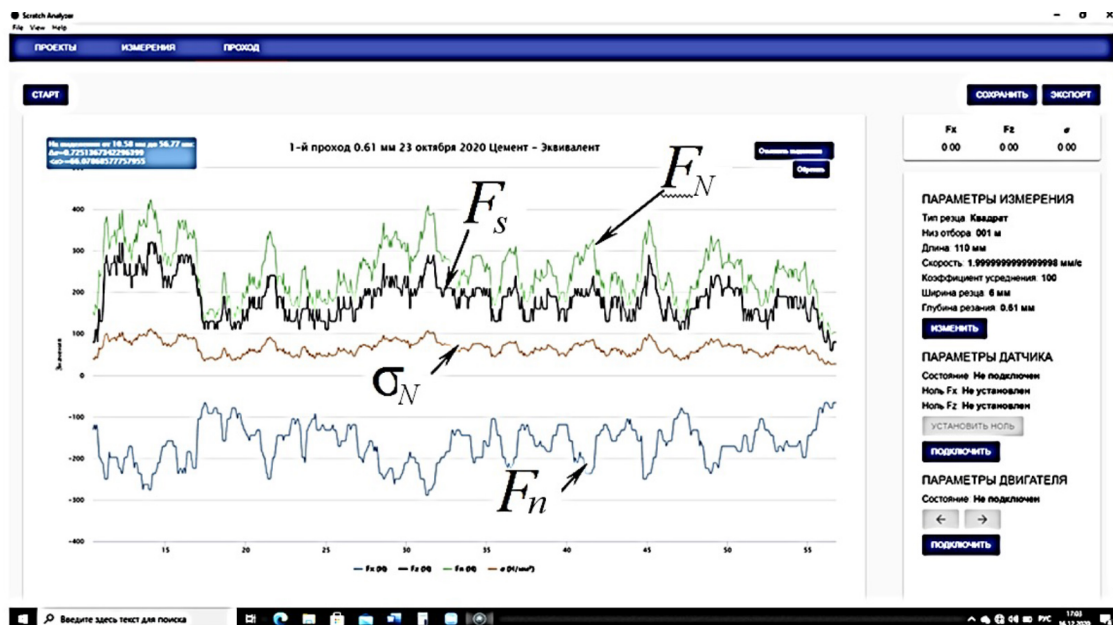
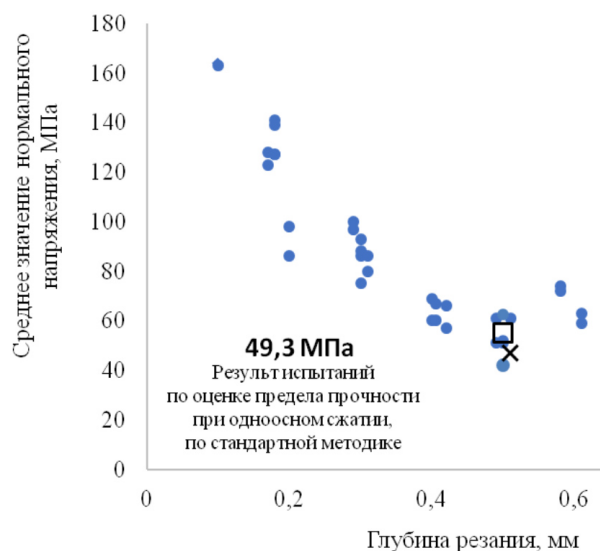


Рис. 2. Результат скрейчирования цементного образца при глубине резания 0,6 мм

При проведении исследований глубина резания варьировалась в диапазоне 0,1– 0,7 мм. Анализ распределения среднего значения нормального напряжения σ_N в зависимости от глубины резания показывает, что при глубине резания 0,5 мм зарегистрированы минимальные нормального напряжения (рис. 3).



● – Scratch Test, × – Одноосное сжатие, □ – Индентирование

Рис. 3 Результаты оценки прочностных характеристик цементных образцов

На следующем этапе испытаний проводим циклическое нагружение индентора с увеличением максимальной нагрузки в каждом последующем цикле. Для каждого цикла строили зависимости величины нагрузки от глубины перемещения индентора на стадии увеличения нагрузки и разгрузки образца [6, 7]. Рассчитывали давление на контактную поверхность путем деления текущего значения нагрузки, приложенной к индентору, на текущую площадь контактной поверхности. Исходили из гипотезы, что ветвь нагружения отражает работу, которая расходуется на схлопывание пор в наиболее нагруженном слое (разрушение материала) и упругое оттеснение подповерхностных слоев, где сжимающее напряжение не достигает значения предела прочности материала на сжатие. В результате под индентором формируется сферический фронт напряжений. Внутри него происходит деструкция материала с последовательным упругим и упругопластическим деформированием. За пределами фронта – происходит упругое оттеснение (рис. 4).

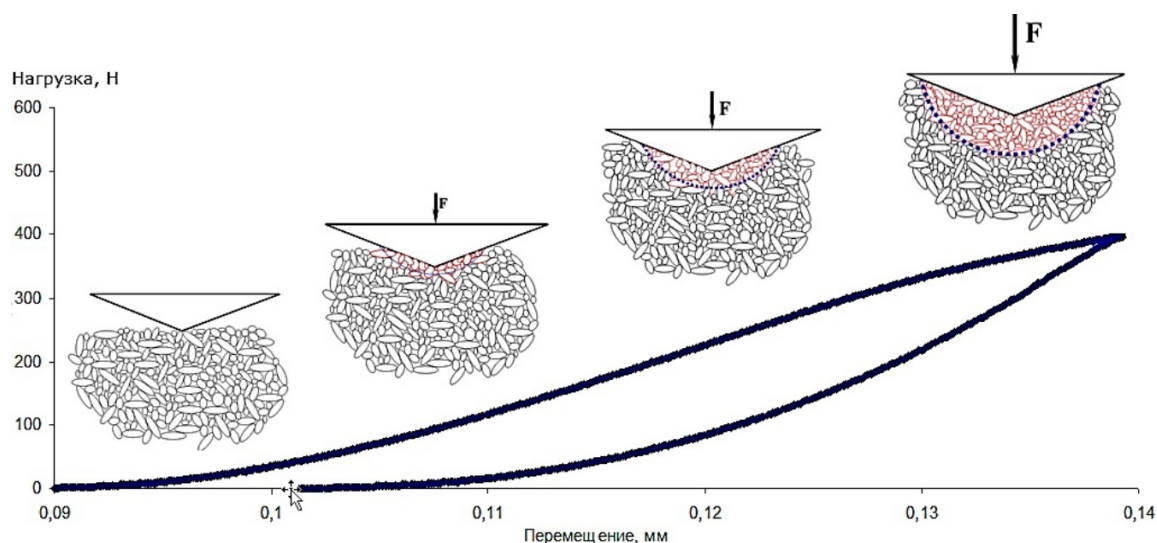


Рис. 4. Схема взаимодействия поверхности индентора с частицами породы на стадии нагружения индентора

Для определения напряжения, которое вызывает схлопывание пор в материале под индентором, предложено рассчитывать разность между давлением на материал в момент внедрения индентора и давлением на стадии его упругого оттеснения. Эту разность определяли для каждого текущего значения перемещения индентора в отдельном цикле. Рассчитанная таким образом величина позволяет определить

изменение напряжения под индентором, ответственного за осуществление пластической деформации разрушаемой породы [15].

Численное моделирование показало, что по мере увеличения глубины внедрения в каждом следующем цикле испытаний сферический фронт внутренних разрушений в породе по своей площади приближается к размерам контактной площадки между индентором и породой. Следовательно, при достижении определенных глубин внедрения давление под индентором будет соизмеримо с величиной напряжения, вызывающего разрушение породы. Это подтвердилось при испытаниях различных горных пород – песчаников, мрамора и др. Во всех случаях разница между давлениями, зафиксированными при внедрении индентора, и его упругого оттеснения изменялась по степенной эмпирической зависимости (3) и при больших глубинах внедрения принимала некую постоянную величину

$$\Delta p_{\max i} = A^{b/f_{\max i}} + \sigma_0, \quad (3)$$

где $\Delta p_{\max i}$ – максимальная разница между давлениями под индентором на стадии его нагружения и разгрузки, Па; A , b – коэффициенты, зависящие от морфологии испытываемой породы и типа индентора; $f_{\max i}$ – максимальная нагрузка в каждом последующем цикле индентирования; σ_0 – предел прочности при одноосном испытании, Па.

Как видно из зависимости 3, при достижении определенных значений $F_{\max i}$ величина экспериментально определяемой характеристики $\Delta p_{\max i}$ приближается значению σ_0 . В рассматриваемом случае при испытании полномерных образцов из тампонажного цемента было получено значение 53 МПа, а по результатам испытаний отдельных частиц этих же образцов, залитых эпоксидной смолой, – 49,4 МПа (рис. 5).

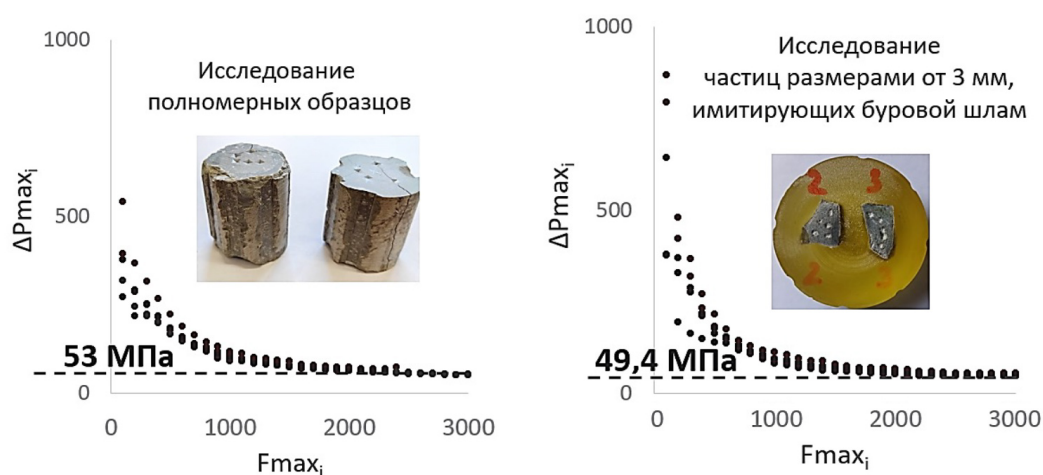


Рис. 5. Результаты индентирования тампонажного цемента

В качестве отличительных особенностей методики следует отметить хорошее совпадение результатов исследования с результатами скрейчирования, а также возможность определения прочностных характеристик на достаточно мелких фрагментах горной породы, размеры от 3 мм [6, 7]. Это дает возможность использовать метод индентирования для прочностных испытаний частиц бурового шлама.

Итоговой проверкой достоверности данных методик стало определение прочности при одноосном сжатии, проведенное на установке для геомеханических испытаний RTR-1000. Его результаты показали, что предел прочности тампонажного цемента, определенный в соответствии с требованиями ГОСТ 21153.2-84 составляет 49,3 МПа.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что современные способы оценки прочностных характеристик горных пород, основанные на склерометрическом и дюрометрическом методах по точности определения предела прочности горных пород не уступают стандартной методике. Их применение не требует специальной

подготовки образцов. С их помощью можно проводить экспресс-анализ прочности горных пород на кернах любого размера, а также на образцах размером до 3 мм, например, частицах обвального шлама из неустойчивых интервалов при бурении.

Авторы выражают благодарность за оказанное содействие в изготовлении лабораторных образцов из тампонажного цемента сотрудникам БелНИПИнефть ПО «Белоруснефть» - заведующему Отделом строительства скважин Д.В.Порошину и инженеру-технологу 2-й категории лаборатории крепления скважин службы химических исследований Отдела строительства скважин Д.В.Пилипчуку

Список литературы

1. ASTM, 2010. ASTM D7012-10 Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.
2. Richgard, T. Rock strength determination from scratch tests / T.Richgard, F.Dagrain, E. Poyol, E.Detournay // Engineering Geology, 2012. – N.147-148.– P. 91-100.
3. *Расширенный метод контролируемого царапания как источник геомеханических данных* / К.В. Торопецкий, Г.А. Борисов, М.И. Самойлов, И.Н. Ельцов // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE 12-14 октября 2020 г.. Москва.
4. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper // Journal für die reine und angewandte Mathematik - 1881.– V.92 - P.156-171.
5. *Разведочное бурение* / А.Г. Калинин, О.В. Ошкордин, В.М. Питерский, Н.В. Соловьев. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 748 с.
6. Пат. № 2721089С1 РФ. Способ определения прочности материала : / И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, В.М. Ткачев, Р.Е. Гутман ; опубл.: 15.05.2020.
7. Патент № 23260 Республика Беларусь. Способ определения предела прочности на сжатие образца горной породы: МПК И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, В.М. Ткачев, Р.Е. Гутман; опубл.: 30.12.2020.
8. Detournay E, Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits. International Journal of Rock Mechanics and Mining //, Sciences and Geomechanics. - 1992. – №29 (1), - p. 13–23.

9. *Assessment of Rock Strength Properties from Cutting Tests: Preliminary Experimental Evidence. Proceedings of the Colloquium Mundanum on Chalk and Shales / E.Detournay, A.Drescher, D.Fourmaintraux, P.Defourny. Brussels, Belgium: // Free University of Brussels,. 1995. - p. 1–10.*

10. *Portable rock strength evaluation device. United States Patent 5670711 : / E. Detournay, A. Drescher, D.A. Hultman ; published 23.09.1997.*

11. Archard, J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces // Journal of Applied Physics. - 1953, – v. 24. - p. 981-988.

12. Useinov A.S., Useinov, S.S. Scratch hardness evaluation with *in-situ* pile-up effect estimation// Philosophical Magazine, - 2012. - V.92 - N.25–27. - P. 3188–3198.

13. N.A. Lvova, K.S. Kravchuk, I.A. Shirokov. Algorithms for Processing Scratch Images in the Sclerometry Method / // Physics of the Solid State – 2013. - V. 55. - N. 8. - P. 1681–1689.

14. Пат. 2679659С1 РФ. Устройство для профилирования упруго-прочностных характеристик горных пород : / К.В.Торопецкий, Г.А. Борисов, Б.О. Михайлов ; опубл.: 12.02.2019.

15. К вопросу использования индентирования для исследования свойств породы / И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, Р.Е. Гутман, В.М. Ткачев // Российская нефтегазовая конференция SPE, 12-15 октября 2021 г., Москва.