

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА**

**И.Н. Степанкин, Р.Е. Гутман**

(БелНИПИнефть)

**А.В. Халецкий**

(НГДУ «Речицанефть»)

**В.М. Ткачёв**

(ГГТУ им. П.О. Сухого)

В современных направлениях геомеханических исследований керна особое внимание уделяется получению достоверных экспериментальных данных, отражающих истинные свойства горных пород. Традиционные подходы во многом ориентируются на ограниченное количество статистически опосредованных результатов. Это вынуждает использовать практически всю полученную выборку экспериментальной статистики [1]. В последнее время требования к точности экспериментальных данных становятся более жесткими, исходя из возрастания роли компьютерного моделирования, которое становится масштабным в связи с постоянным увеличением мощности компьютерных комплексов. Достоверность моделей находится в прямой связи с точностью исходных данных, к которым относятся модуль упругости и прочность горных пород.

Для определения указанных характеристик, помимо широко известных методик, основанных на объемном разрушении керна, используются способы склерометрического и дюрометрического воздействия на горные породы. Их техническая сущность дает возможность говорить о неразрушающей концепции испытаний, при которых многократное воздействие на один и тот же образец позволяет получать статистически опосредованную выборку данных.

Комплекс проведенных исследований включает испытания скретчированием на установке Scratch Test, индентированием, циклическим вдавливанием индентора, а также одноосное сжатие на установке для исследования прочностных свойств керна RTR-1000. Оценка прочностных показателей скретчированием осуществляется на образцах керна диаметром от 45 до 120 мм. Для испытаний индентированием подходят как полномерные образцы, так и частицы бурового шлама с размерами от 3 мм. Стандартные испытания реализуются на цилиндрических образцах размерами диаметром 30х60 мм.

Первые опыты по оценке свойств горных пород методом скретчирования (склерометрией) осуществлены около 30-ти лет назад [2, 3]. Их результативность, во многом, обусловлена конструкцией и состоянием

испытательного оборудования, а интерпретация результатов зависит от степени износа режущего инструмента, его погружения в породу и собственно свойств самой породы.

Дюрометрия реализуется путем внедрения в образец твердого штампа и по своей физической сущности является индентированием. 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, в том числе 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].

#### **Объекты и методики исследований**

Для испытаний по оценке эффективности комплексного исследования свойств кернов, в соответствии с ГОСТ 1581-96, были подготовлены образцы из тампонажного цемента, применяемого при строительстве скважин. Состав: портландцемент ПЦТ I-G-CC-1, вода пресная, водоцементное отношение 0,44. Образцы диаметром 40x80 мм.

При проведении скретчирования использовали лабораторную установку, способную обрабатывать керн общей длиной до 500 мм с диаметрами 40-120 мм (рисунок 1а).

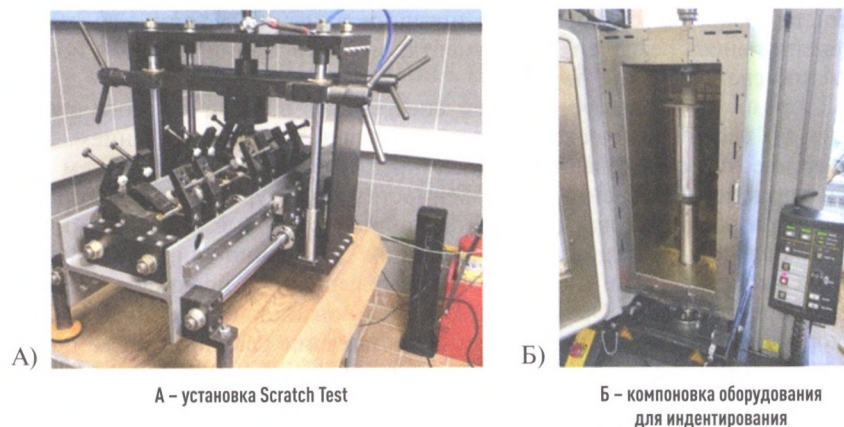
Для индентирования применяли оригинальные приспособления из твердого сплава ВК-8 с рабочей поверхностью, идентичной пирамиде Виккерса. Нагружение образцов осуществляли на прессе, снабженном термокамерой (рисунок 1б). Методика испытаний основана на циклическом вдавливании индентора с дискретным возрастанием максимальной нагрузки в каждом последующем цикле нагружения.

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

#### **Результаты исследований и их обсуждение**

Схема первой лабораторной установки, а также методики интерпретации результатов скретчирования приведены в работе [8]. Дальнейшая модернизация установок другими авторами 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 [9].

Среди наиболее востребованных вариантов интерпретации получаемого сигнала используется подход по регистрации пиковых значений



**Рисунок 1.** – Общий вид оборудования, примененного для исследования керна продольной силы на записанной кривой скретчирования для расчета показателя  $UCS$  по следующей зависимости:

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

где  $F_t$  – усредненная величина пиковых значений продольной компоненты силы резания, Н [2];

$w$  – ширина резца, мм;

$d$  – глубина резания, мм.

Зависимость (1) отличается удовлетворительной точностью при условии, что реализуется так называемый «пластический» режим резания. Т.е. весь объем удаляемого материала, претерпевает деструктуризацию на уровне разрушения цементных связей между отдельными зернами. Отмеченная особенность зарегистрирована при испытании однородных материалов с глубинами скретчирования 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 скретчирования [2]. Комплексный учет вертикальной и горизонтальной составляющих силы сопротивления резанию предложен в работе [3]. Согласно представленной методике, предел прочности при одноосном сжатии рассчитывается по зависимости:

$$UCS = k (F_t - \mu F_n) / (w (d - \alpha F_n)), \quad (2)$$

где  $F_t$  – продольная компонента усилия, Н;

$F_n$  – вертикальная компонента усилия, Н;

$\mu$  – коэффициент трения резца по породе;  
 $w$  – ширина резца, мм;  
 $d$  – глубина резания, мм;  
 $\alpha$  – вертикальная податливость измерительной системы, мм/Н;  
 $k$  – константа пропорциональности.

По нашему мнению, использование модернизированной зависимости (2) имеет ряд неопределенностей, которые могут быть нивелированы на основании учета двух аспектов.

Во-первых, вертикальная податливость нагружающей системы установки ( $\alpha$ ) измеряемая в мм/Н, имеет достаточно незначительное влияние на окончательный результат, если нагружающие узлы изготовлены достаточно жесткими и обладают податливостью не более  $10^{-5}$  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 расчетах предела прочности [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. Ее ширина составляла 6 или 8 мм. Это позволило ограничить эксплуатационные нагрузки на узлы экспериментальной установки и зарегистрировать максимально точные реакции испытуемого материала без 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  $\sigma_N$  на передней поверхности резца. Как видно из рисунка 2, несмотря на выраженную зубчатость силовых показателей при глубине скретчирования 0,61 мм, кривая, отражающая изменение нормального напряжения, возникающего на передней поверхности резца, имеет достаточно компактный вид с точки зрения амплитудно-частотного распределения. При проведении исследований глубина резания варьировалась в диапазоне 0,1-0,7 мм. Анализ распределения величин среднего значения нормального напряжения  $\sigma_N$  в зависимости от глубины резания показывает, что в области глубины резания 0,5 мм зарегистрированы минимальные величины нормального напряжения (рисунок 3).

Следующий этап испытаний осуществлялся путем циклического нагружения индентора с возрастанием 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

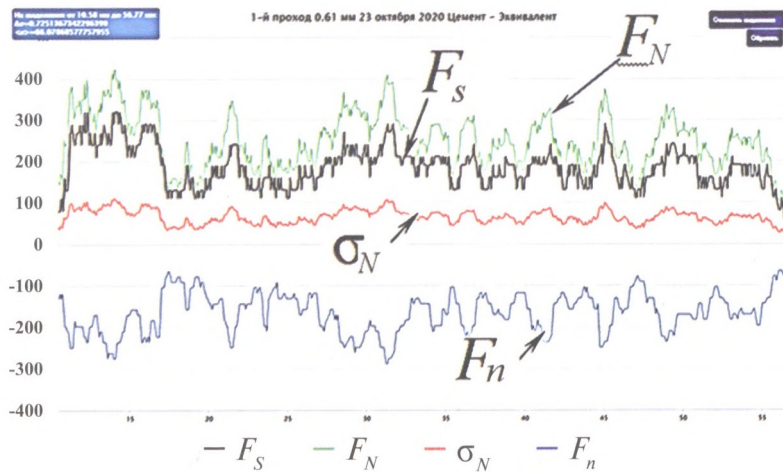


Рисунок 2. — Результат скретчирования цементного образца при глубине резания 0,61 мм

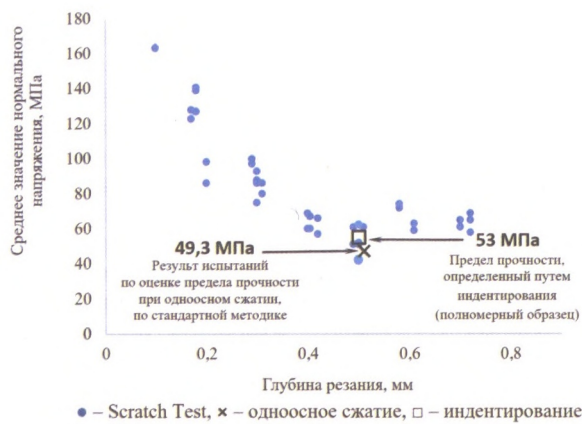
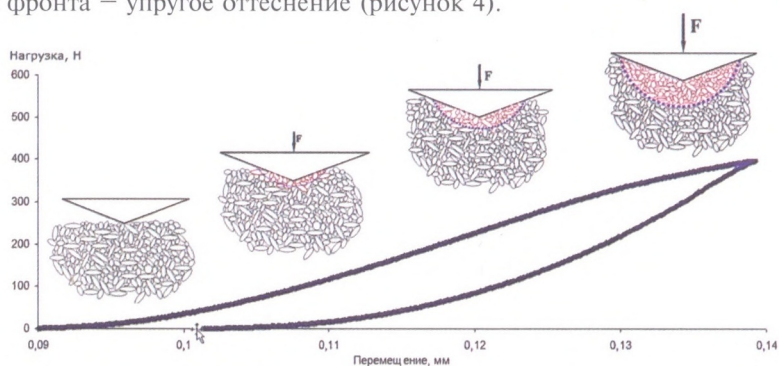


Рисунок 3. — Совокупные результаты оценки прочностных характеристик цементных образцов

к индентору на текущую площадь контактной поверхности. Исходили из гипотезы, что площадь криволинейной трапеции, отсекаемая ветвью нагружения, отражает работу, которая расходуется на схлопывание пор в наиболее нагруженном слое (разрушение материала), а также упругое оттеснение подповерхностных слоев, в которых величина сжимающего напряжения не достигает значения предела прочности материала на сжатие. В результате под индентором формируется сферический фронт

напряжений. Внутри его происходит деструкция материала с последовательным упругим и упругопластическим деформированием. За пределами фронта — упругое оттеснение (рисунок 4).



**Рисунок 4.** — Схема взаимодействия поверхности индентора с частицами породы на стадии нагружения индентора

Для определения величины 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 каждой величины текущего значения перемещения индентора в отдельном цикле. Рассчитанная таким образом величина позволяет определить изменение напряжения под индентором, ответственного за осуществление работы пластической деформации разрушаемой породы [10].

Численное моделирование показало, что по мере возрастания 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 (рисунок 5):

$$\Delta P_{\text{maxi}} = A^{b/F_{\text{maxi}}} + \sigma_0, \quad (3)$$

где  $A$  и  $b$  — коэффициенты, зависящие от морфологии испытуемой породы и типа индентора;



$\Delta P_{\max i}$  – максимальная разница между давлениями под индентором на стадии его нагружения и разгрузки, Па;

$F_{\max i}$  – величина максимальной нагрузки в каждом последующем цикле индентирования, Н;

$\sigma_0$  – предел прочности при одноосном испытании, Па.

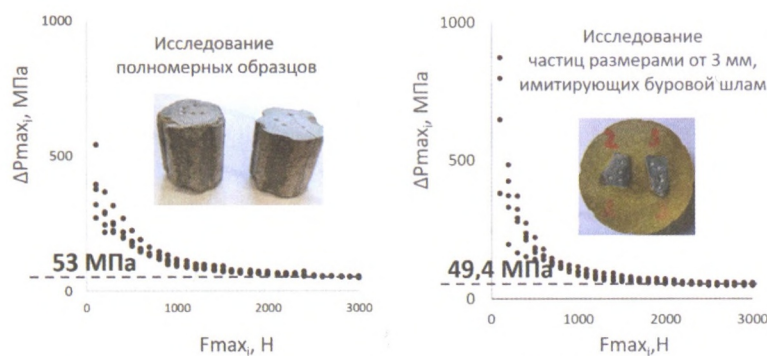


Рисунок 5. – Результаты индентирования тампонажного цемента

Как видно из зависимости (3), при достижении определенных значений  $F_{\max i}$ , величина экспериментально определяемой характеристики приближается к значению  $\sigma_0$ . В нашем случае при испытании полномерных образцов из тампонажного цемента было получено значение 53 МПа. А по результатам испытаний отдельных фрагментов этих же образцов, залитых эпоксидной смолой, – 49,4 МПа (рисунок 5).

В качестве отличительных особенностей методики, следует отметить хорошее совпадение результатов исследования с итогами скретчирования, а также возможность определения прочностных характеристик на достаточно мелких фрагментах горной породы, величиной от 3 мм [6, 7]. Это делает возможным использование метода 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. Ее 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 производить экспресс-анализ прочности горных пород на кернах любого размера, а также малоразмерных образцах величиной от 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 РУП «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. Системная технология как важный элемент рациональной разработки нефтяных месторождений / А.С. Петраков, А.В. Фомкин, С.А. Жданов, Р.Р. Раянов, Е.Н. Байкова // Тезисы межд. научн.-техн. конф. «Инновационные решения в геологии и разработке ТРИЗ». — М. : ЗАО «Издательство «Нефтяное хозяйство», 2021. — С. 32.
2. Richgard, T. Rock strength determination from scratch tests / T. Richgard, F. Dagrain, E. Poyol, E. Detournay // Engineering Geology. — 2012. — № 147-148. — P. 91-100.
3. Торопецкий, К.В. 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, г. Москва, 12-14 октября 2020 г. — 10 с.
4. Hertz, H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // Journal für die reine und angewandte Mathematik. — 1881. — V. 92. — P. 156-171.
5. Калинин, А.Г. Разведочное бурение : учеб. для вузов / А.Г. Калинин, О.В. Ошкордин, В.М. Питерский, Н.В. Соловьев. — М. : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. — 748 с.
6. Способ определения прочности материала : пат. 2721089С1 РФ : МПК G01N 3/32 (2020.01); МПК G01N 3/40 (2020.01) / И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, В.М. Ткачев, Р.Е. Гутман ; дата публ.: 15.05.2020.
7. Способ определения предела прочности на сжатие образца горной породы : пат. 23260 РБ : МПК (2006.1) G01N 3/32 / И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, В.М. Ткачев, Р.Е. Гутман ; дата публ.: 30.12.2020.
8. Portable rock strength evaluation device. United States : patent 5670711, G01N 3/00 / E. Detournay, A. Drescher, D.A. Hultman ; published: 23.09.1997.
9. Устройство для профилирования упруго-прочностных характеристик горных пород : пат. 2679659С1 РФ : МПК G01N 3/46 (2018.08); G01N 19/06 (2018.08) / К.В. Торопецкий, Г.А. Борисов, Б.О. Михайлов ; дата публ.: 12.02.2019.
10. Степанкин, И.Н. К вопросу использования индентирования для исследования свойств породы / И.Н. Степанкин, А.В. Халецкий, Р.Е. Гутман, В.М. Ткачев // Российская нефтегазовая конференция SPE, г. Москва, 12-15 октября 2021 г. — 11 с.