

Применение метода контролируемого царапания для исследования механических свойств горных пород

А.В. Носиков

руководитель группы петрофизического обеспечения отдела геомеханического и седиментационного моделирования¹

К.В. Торопецкий

заместитель генерального директора по науке²

Б.О. Михайлов

начальник научно-аналитического управления²
bmikhailov@nknipi.ru

П.С. Черныш

начальник управления лабораторных исследований²

А.А. Дорошенко

к.т.н., заместитель начальника ИТЦ по моделированию¹
a.doroshenko@ggr.gazprom.ru

Г.А. Борисов

к.ф.-м.н., генеральный директор²

¹ООО «Газпром геологоразведка», Тюмень, Россия

²ООО «НовосибирскНИПИнефть», Новосибирск, Россия

В статье показан способ непрерывного определения упруго-прочностных свойств горных пород методом контролируемого царапания. Созданная установка позволяет получать информацию о силе сопротивления перемещению индентора, царапанию на цилиндрических образцах синтетических и натуральных материалов (кернов). Разработанная методика позволяет пересчитывать полученные с помощью установки значения силы в предел прочности при неограниченном одноосном сжатии.

Материалы и методы

Метод контролируемого царапания, специализированная установка для царапания образцов керна, анализ результатов.

Ключевые слова

полноразмерный керн, скретч-тест, методика контролируемого царапания, упруго-прочностные характеристики, профильные измерения, твёрдость, склерометрия

В нефтегазовой отрасли все более актуальным направлением работы является создание и внедрение цифровых геолого-геомеханических моделей резервуара, основанных на построении пространственного распределения физико-механических свойств и напряженного состояния горных пород. Использование таких моделей позволяет решать широкий спектр прикладных задач на всем жизненном цикле скважины, включая проектирование бурения, крепления и освоения [1].

Значения физико-механических свойств (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, предел прочности) могут быть получены только при лабораторном исследовании образцов кернового материала, отобранного в процессе бурения поисково-разведочных и эксплуатационных скважин. Однако такие исследования являются дорогостоящими, а количество кернового материала, извлекаемого на поверхность, ограничено и, как правило, охватывает только продуктивные горизонты. Кроме того, существуют горные породы (каменные соли, аргиллиты), отбор образцов из которых или их анализ по разным причинам затруднены (текучесть солей при статических исследованиях, развитие трещиноватости) [2].

Поэтому принятым способом исследования физико-механических свойств является построение многомерных регрессионных моделей с использованием совокупности данных лабораторных исследований образцов керна, результатов интерпретации комплекса геофизических исследований скважин (ГИС), геолого-технологических исследований (ГТИ) в процессе бурения, а

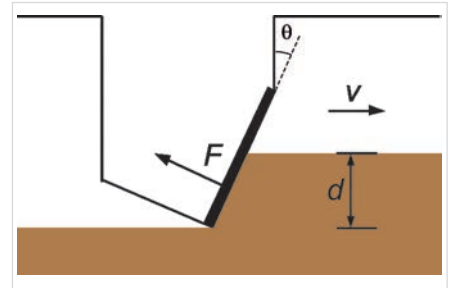


Рис. 1 — Изображение силы при царапании
 Fig. 1 — Image of force during scratching

также наземных и скважинных методов сейсмо- и электроразведки и т.д. [2].

В отличие от перечисленных выше методов исследования керна, дающих представление о механических характеристиках в точках изъятия образцов, известен подход, названный на Западе «скретч-тестом» (далее — SRS), а в России — «методом контролируемого царапания» (далее — МКЦ). Этот метод дает практически непрерывную (или квази-непрерывную) характеристику прочностных свойств и может использоваться для предварительного расчленения на механические фракции [3]. Основа МКЦ состоит в измерении силы сопротивления при царапании образца керна, и, в зависимости от режимов, характеризует предел прочности при неограниченном одноосном сжатии (далее — UCS) или коэффициент трещиноватости материала [4].

Целью работы является методическое обоснование применения МКЦ для экспресс-расчленения на механические фракции и профилирования упруго-прочностных

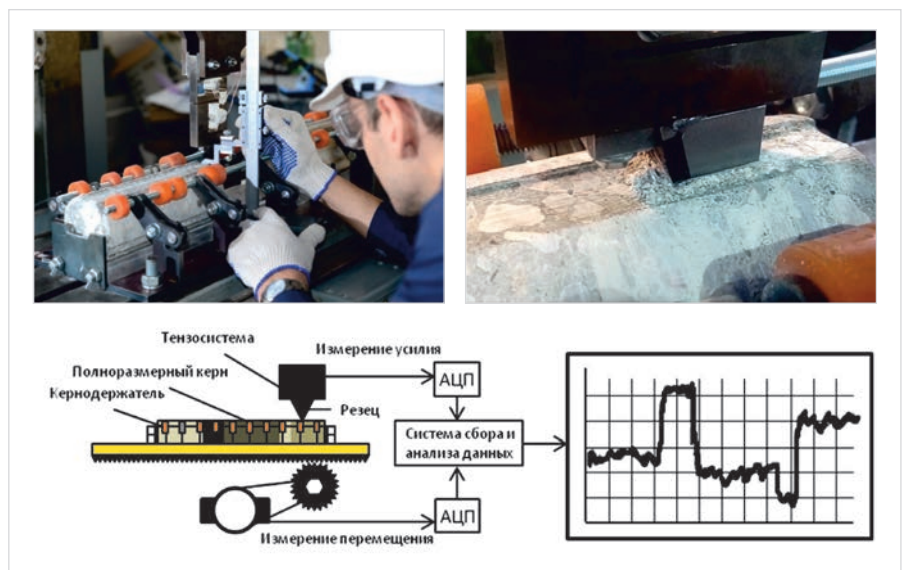


Рис. 2 — Схема и фото установки
 Fig. 2 — Diagram and photo of the test equipment

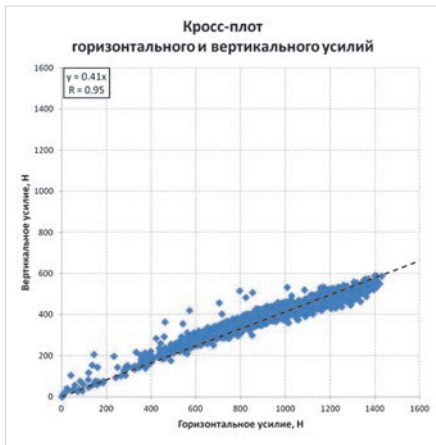


Рис. 3 — Сопоставление вертикальной и горизонтальной сил на резце
Fig. 3 — Comparison of vertical and horizontal forces on the tool bit

свойств полноразмерных образцов керна.

Способы определения предела прочности

В массовом сегменте лабораторных испытаний для определения предела прочности используется метод одноосного сжатия образцов правильной формы плоскими плитами по ГОСТ 21153.2-84. Учитывая погрешность определения упруго-прочностных свойств пород при лабораторных испытаниях, субъективный подход при отборе стандартных образцов керна из полноразмерного, а также невысокую степень связи точечных результатов лабораторных измерений и ГИС, конечная точность получаемых моделей оказывается недостаточной для решения практических задач [2]. Это влечет за собой неправильную оценку свойств и напряжений геологического объекта, выбора направления бурения, расчет эффективности ГПП и т.д. Зачастую вводятся калибровочные параметры, куда, фактически, переносятся все неопределенности, возникающие в модели на разных этапах ее конструирования и не поддающиеся прямым замерам.

Оригинальная методика контролируемого царапания применяется для определения микротвердости материала посредством внедрения при нагрузке индентора не более 2 Н [5]. Однако с 1992 года предпринимаются попытки адаптировать данную методику для определения прочности горных пород

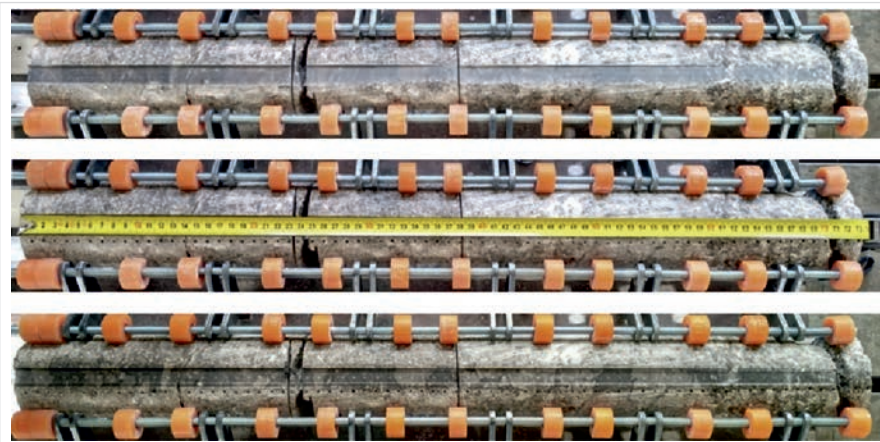


Рис. 4 — Полноразмерный керна на разных стадиях исследования (сверху вниз): сразу после шлифовки, разметка под тест Бринелля, после контролируемого царапания
Fig. 4 — Full-size core at various stages of the study (from top to bottom): after grinding, marking for a Brinell test, after controlled scratch-test

[6] и [7] и получения метода оценки предела прочности, лишённого перечисленных выше недостатков.

Суть метода контролируемого царапания заключается в измерении силы на резце при царапании керна, изображенного на рис. 1. Существует два режима разрушения материала при проведении исследования: пластический и хрупкий [8]. Пластическое разрушение происходит при небольших глубинах резки (для разных пород верхний предел глубины варьируется от ~0.5 мм до 2 мм) [8] и характеризует прочность материала. В этом режиме порода разрушается на мелкие частицы размером 10–100 мкм (фактически это зерна, складывающие горную породу). При превышении предельной глубины царапания реализуется режим хрупкого разрушения, характеризующийся созданием трещины вдоль направления царапания и последующим отколом больших обломков породы размером порядка глубины царапания [9].

Согласно работам [6, 7, 8] сила на резце прямо пропорциональна пределу прочности при одноосном сжатии исследуемого материала:

$$F = F_{horizontal} + F_{vertical} \sim \epsilon w d \quad (1),$$

где $F_{horizontal}$ и $F_{vertical}$ — горизонтальная и вертикальная компоненты силы, Н; ϵ — удельная энергия разрушения материала, МПа; w — ширина резца, мм; d — глубина погружения

резца, мм. Принимая во внимание тот факт [10], что удельная энергия разрушения материала прямо пропорциональна UCS, то выражение принимает вид:

$$UCS(\text{МПа}) = \alpha(1/\text{мм}) \frac{F_{horizontal}(\text{Н})}{d(\text{мм})} \quad (2),$$

где α — константа, в которую входит ширина резца и соотношение внутренней энергии разрушения и UCS, 1/мм.

Экспериментальная установка

Испытания проводились на специализированной установке, показанной на рис. 2. Механическая часть позволяет изокинетически (с постоянной скоростью) царапать образцы керна длиной от 10 до 1000 мм на скоростях от 12,5 до 4000 мм/мин. Кернадержатель состоит из секций, в которых может закрепляться керна разных форм и размеров. Глубина царапания может меняться в диапазоне от 50 до 2500 мкм с дискретностью в 50 мкм и точностью в 10 мкм.

Установка позволяет измерять силу в диапазоне 0–2000 Н с точностью 0,5 Н, причем независимо, как горизонтальную, так и вертикальную компоненты. Исполнительная часть представлена твердосплавным резцом, который устанавливается под углом в диапазоне 70–90° по отношению к плоскости образца.

Методика включает следующие подготовительные операции:



Рис. 5 — Схема выбуривания стандартных образцов керна для измерения UCS
Fig. 5 — Scheme of drilling standard cores for measuring UCS

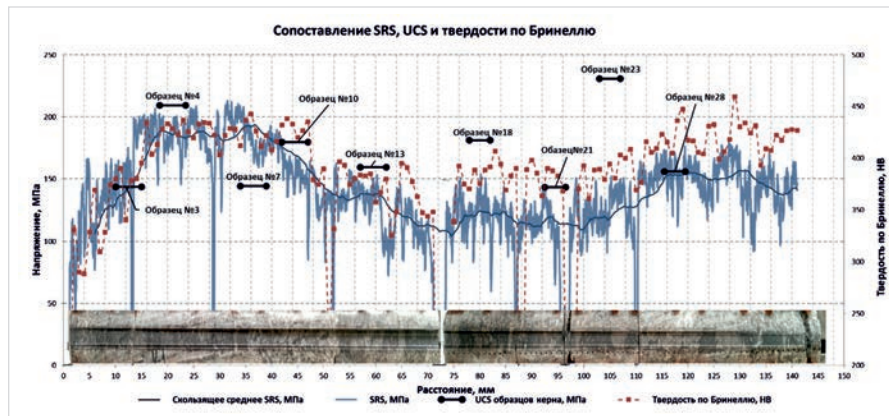


Рис. 6 — Результат интерпретации скретч-теста, совмещенный с точечными замерами твердости по Бринеллю, и точечными замерами UCS на стандартных образцах керна
Fig. 6 — Results of interpretation of scratch test, combined with Brinell hard point measurements, and UCS spot measurements on standard core samples

- 1 Закрепление полноразмерного керна в картридже.
- 2 Шлифование поверхности под единую плоскость.
- 3 Финальное выравнивание под резец.

Далее выполняется контролируемое царапание породы при заглублении 200 мкм и скорости 100 мм/мин.

Анализ полученных результатов

Авторами статьи были исследованы полноразмерные образцы (диаметр 100 мм) керна, отобранные из скважины Ковыктинского месторождения (Восточная Сибирь). Образцы керна представлены отложениями

литвинцевской свиты, сложенной преимущественно доломитами и известковистыми доломитами. Далее приведены результаты контролируемого царапания 1,5 метров керна в 3 проходки. После каждой проходки проводились замеры коэффициента твердости по шкале Бринелля с шагом 10 мм. Для определения UCS классическим методом были также отобраны девять коллекций, состоящих из трех стандартных цилиндрических образцов в каждой коллекции (диаметр 30 и длина 60 мм), отобранных вдоль оси полноразмерного керна (поперек естественного напластования горных пород).

На рис. 3 приведен кросс-плот

вертикального (по нормали) и горизонтального (по касательной) сил на резце.

Наблюдается отличная (достаточная для анализа результатов) корреляция горизонтальных и вертикальных сил, причем степенная функция точнее описывает корреляционную зависимость, учитывая нелинейность при больших нагрузках. Ввиду высокой степени связи вертикальной и горизонтальной сил, все дальнейшие вычисления выполнялись с использованием горизонтальной составляющей.

На рис. 4 приведены фотографии полноразмерного керна на разных стадиях исследования, включая фотографии сразу после шлифовки и разметку под тест Бринелля. На рис. 5 показана схема выбуривания стандартных образцов из полноразмерного керна.

На рис. 6 приведен результат интерпретации проведенных исследований — расчетное значение UCS, коэффициент твердости по Бринеллю и точечные замеры UCS на стандартных образцах керна.

Две точки UCS (образцы №18 и 23), наиболее сильно отклонившиеся от профиля UCS, вычисленного по результатам МКЦ, попадают в зоны с наибольшей дисперсией силы на резце, т.е. повышенной неоднородности, и были исключены как из калибровок, так и теста зависимостей. В области высокой прочности (UCS > 200 МПа) тест по Бринеллю недооценивает фактический UCS.

На рис. 8 показаны кросс-плоты нагрузки на резце и полученных величин с учетом тестовой и обучающей выборок.

В результате калибровки на обучающей выборке был установлен линейный коэффициент, связывающий силу на резце с UCS с коэффициентом корреляции $R=0,87$. Здесь важно отметить, что калибровочная выборка должна охватывать полный диапазон UCS, включая минимальное и максимальное значения. В результате проверки полученной калибровочной зависимости на тестовой выборке был получен коэффициент корреляции $R=0,70$, что говорит об удовлетворительном качестве интерпретации данных МКЦ. Авторами статьи отобраны тройки стандартных образцов, каждый из которых привязан к одной и той же координате по образцу и характеризует однородность прочностных свойств в сечении полноразмерного образца. При сопоставлении с данными МКЦ были выбраны образцы, расположенные прямо напротив дорожки МКЦ. (расположенные максимально близко к треку от резца МКЦ).

Графики скользящей дисперсии и скользящего градиента являются отражением механической однородности керна и могут быть использованы для обоснования мест отбора стандартных образцов для построения паспорта прочности. Причинами неоднородности могут быть наличие скрытой трещиноватости, слоистости и прочих структурно-текстурных особенностей горных пород. Соответственно, при отборе стандартных образцов следует расположить тройку образцов таким образом, чтобы один из них располагался прямо напротив дорожки МКЦ. В дальнейшем, UCS данного образца должен быть определен статическим методом. На рис. 9 показаны результаты трех последовательных проходок МКЦ и замеров коэффициента твердости методом Бринелля.

Наблюдаемый нами нелинейный рост нагрузки при большем заглублении, вероятно,

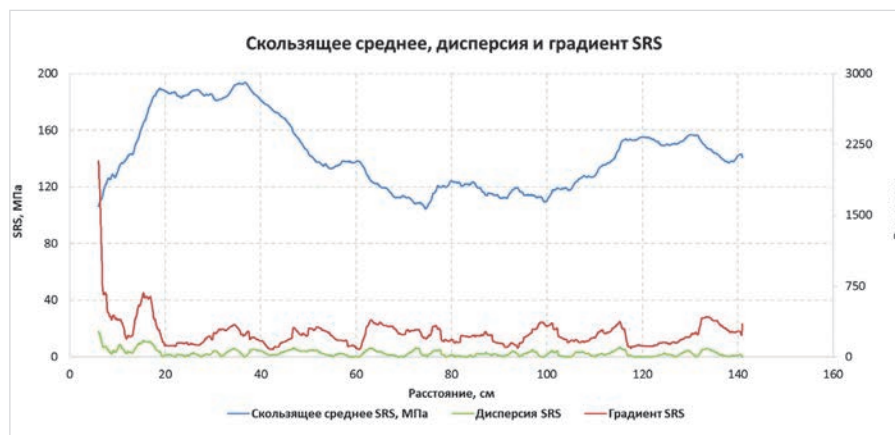


Рис. 7 — Результат вычисления скользящего среднего и дисперсии
Fig. 7 — The result of the calculation of the moving average and the variance

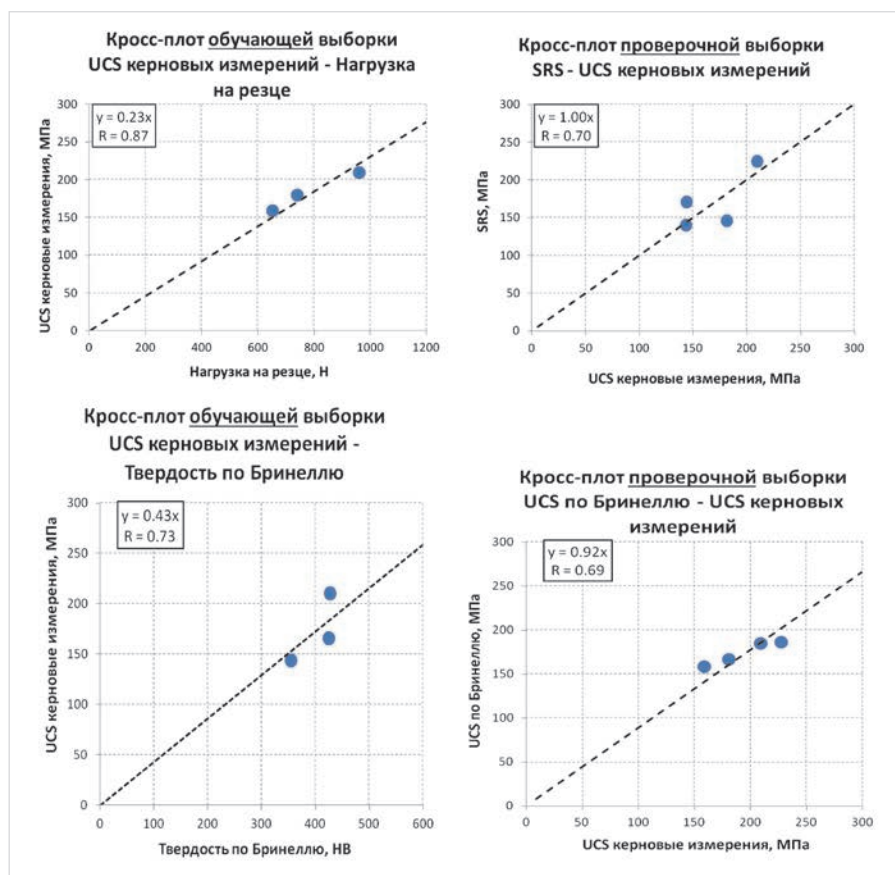


Рис. 8 — Кросс-плот UCS на стандартных образцах — сила на резце (на обучающей выборке) и кросс-плот SRS по скретч-тесту — UCS на стандартных образцах (на проверочной выборке)

Fig. 8 — Crossplot UCS on standard samples - force (on training sample), and crossplot SRS (scratch test) - UCS on standard samples (on a test sample)

связан с трением о боковые грани трассы, так как более прочные породы могут не разрушаться, а сжиматься по бокам, образуя трассу меньшей ширины.

На рис. 10 изображен сводный графический планшет 18 метров разреза (литвинцевская свита), включающий литостратиграфию, фотоколонку керна, результаты интерпретации МКЦ (SRS) и комплекс ГИС (каверномер, гамма-, гамма-гамма-плотностной, нейтрон-нейтронный, акустический и электромагнитный каротажи). Видно, что SRS намного детальнее расчленяет разрез по механическим свойствам, нежели комплекс ГИС. Кроме того, на SRS видны вариации, которые никак не объясняются геофизическими характеристиками, и, следовательно, не могут быть точно восстановлены с помощью комплекса ГИС.

Для кластерного расчленения и разметки полноразмерного керна можно использовать три параметра из результатов профилирования: среднее значение UCS, дисперсию UCS, соотношение вертикальной и горизонтальной составляющей нагрузки на резец. Полученный профиль предела прочности с высоким разрешением можно считать достоверным и использовать его в дальнейшем как для кластерного расчленения полноразмерного керна, так и для целей геомеханического моделирования.

Нелинейный рост нагрузки при большем заглублении, вероятно, связан с трением о боковые грани трассы, так как более прочные породы могут не разрушаться, а сжиматься по бокам. Следовательно, необходим только один измерительный проход. Вертикальная и горизонтальная нагрузки отлично согласуются.

Тест по методу Бринелля не охватывает диапазон UCS > 200 МПа для горных пород, вследствие чего происходит недооценка в области высокой прочности. Увеличение погрешности в определении истинного профиля UCS по глубине скважины неизбежно, так как не всегда предел прочности по поверхности керна коррелирует с объемным пределом прочности.

Итоги

Приведены результаты контролируемого царапания 1.5 метров керна в 3 проходки. После каждой проходки проводились замеры коэффициента твердости по шкале Бринелля с шагом 10 мм. Для определения UCS классическим методом были также отобраны девять коллекций, состоящих из трех стандартных цилиндрических образцов в каждой коллекции (диаметр 30 и длина 60 мм), отобранных вдоль оси полноразмерного керна (поперек естественного напластования горных пород).

Выводы

Методика контролируемого царапания керна позволяет увеличить детальность и точность изучения физико-механических свойств горных пород для построения одномерных геомеханических моделей. Сопоставление полученных детальных профилей физико-механических характеристик с результатами ГИС позволяет установить достоверные корреляции при восстановлении синтетических профилей упруго-прочностных свойств горных пород по разрезу. Более того, результат профилирования физико-механических свойств по керну может служить



Рис. 9 — Сопоставление последовательных проходок скретч-теста и твердости по Бринеллю

Fig. 9 — Comparison of sequential scratch test results and Brinell hardness

характеристикой для уточнения привязки керна, особенно в наиболее проблемных интервалах отбора керна, например, сложенных галогено-сульфатно-карбонатными горными породами, где увязка по ГК или БК может быть неоднозначной.

Помимо оценки физико-механических свойств методика контролируемого царапания может использоваться для разметки полноразмерного керна — определения мест выбуривания стандартных образцов с целью получения максимальной информации об объекте при минимальном числе исследований, а также поиска наиболее однородных по свойствам зон для выбуривания наиболее близких по характеристикам образцов для построения паспорта прочности.

Литература

1. Торопецкий К.В., Каюров Н.К., Черемисин А.Н., Лушев М.А., Самойлов М.И., Ульянов В.Н., Борисов Г.А. Построение 1D физико-механических моделей и решение задач устойчивости ствола скважины и прискважинной зоны // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. №11. С. 29–41.
2. Торопецкий К.В., Ульянов В.Н., Борисов Г.А., Курмангалиев Р.З., Каюров Н.К., Аржанцев В.С. Обзор петрофизических зависимостей для построения одномерных геолого-геомеханических моделей в задачах устойчивости ствола скважины при бурении // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2016. №12. С. 31–44.
3. Germy C., Richard T., Mappanyompa E., Lindsay C., Kitching D., Khaksar A. The Continuous-Scratch Test: A High-Resolution Strength Log for Geomechanical and Petrophysical Characterization of Rocks. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2014, pp. 432–440.
4. Lin J.-S., Zhou Y. Can scratch tests give fracture toughness? Engineering Fracture Mechanics, 2013, issue 109, pp. 161–168.
5. Паршев С.Н., Полозенко Н.Ю. Микротвердость материалов. Методические указания к лабораторной работе. Волгоград: ВолгГТУ, 2004. 15 с.
6. Almenara R., Detournay E. Cutting experiments in sandstones with blunt PDC cutters. ISRM Symposium EuRock, 1992, pp. 215–220.
7. Suarez-Rivera R., Stenebrataten J., Dagrain F. Continuous Scratch Testing on Core Allows Effective Calibration of Log-Derived Mechanical Properties for use in Sanding Prediction Evaluation. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Texas, USA, 2002, 7 p.
8. Richard T. Determination of Rock Strength from Cutting Tests. Master's thesis, University of Minnesota, 1999.
9. Gamwo I.K., Lyons D.K., Lin J.S., Jaime M.C., Finite Element Modeling of Rock Cutting. 44th U.S. Rock Mechanics Symposium, 2010, 7 p.
10. Dagrain F. Influence of the cutter geometry in rock cutting with PDC cutter: an experimental approach. Master's thesis. University of Minnesota, 2001.

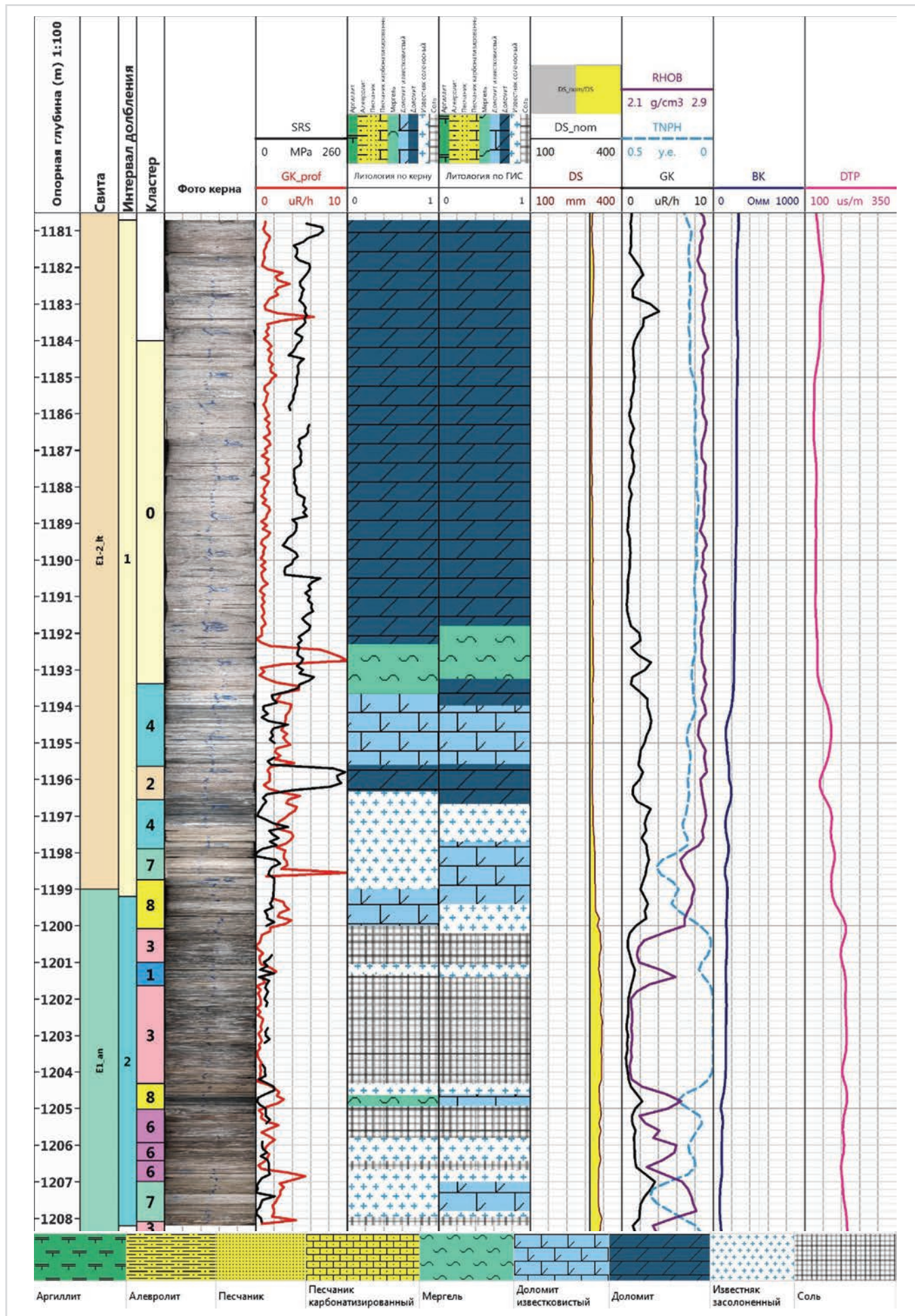


Рис. 10 — Сводный планшет, включающий литостратиграфию, фотоколонку керна, результаты интерпретации МКЦ и комплекс ГИС
 Fig. 10 — Consolidated tablet including lithostratigraphy, core photon, interpretation results of scratch-test and well logging complex

The application of the method of controlled scratching to study the mechanical properties of rocks

UDC 550.3

Authors:

A.V. Nosikov — the head of the petrophysical support group of the geomechanical and sedimentation modeling department¹

K.V. Toropetskiy — deputy general director for science²

B.O. Mikhailov — head of scientific and analytical department²; bmikhailov@nsknipi.ru

P.S. Chernysh — head of laboratory research department²

A.A. Doroshenko — Ph.D., deputy head of ETC for modeling¹; a.doroshenko@ggr.gazprom.ru

G.A. Borisov — Ph.D., general director²

¹Gazprom Geologorazvedka" LLC, Tyumen, Russian Federation

²"NovosibirskNIPIneft" LLC, Novosibirsk, Russian Federation

Abstract

The article shows a method for the continuous determination of the elastic-strength properties of rocks by the method of controlled scratching. The created installation allows obtaining information about the resistance to displacement of the indenter, scratching on cylindrical samples of synthetic and natural materials (cores). The developed technique allows to recalculate the values of force obtained by setting the strength of the tensile strength with unlimited uniaxial compression.

Materials and methods

Method of controlled scratching, specialized installation to scratch core samples, results analysis.

Keywords

full-size core, scratch test, controlled scratching method, elastic-strength characteristics, profile measurements,

hardness, sclerometry

Results

The results of a controlled scratching of 1.5 meters of core in 3 penetrations are given. After each drilling, measurements were made of the Brinell hardness coefficient in steps of 10 mm. For the determination of UCS by a classical method, nine collections were also selected, consisting of three standard cylindrical samples in each collection (diameter 30 and length 60 mm). All samples of the standard core were selected along the axis of the full-length core (across the natural bedding of rocks).

Conclusions

Scratch test of core makes it possible to increase the detail and accuracy of studying physical and mechanical properties of rocks for constructing one-dimensional geomechanical models. Comparison of obtained detailed profiles of physical

and mechanical characteristics with the results of well logging makes it possible to establish reliable correlations during the restoration of synthetic profiles of the elastic-strength properties of rocks along a section. Moreover, the result of profiling the physico-mechanical properties over core can serve as a characteristic for the refinement of core binding, especially in the most problematic core sampling intervals, for example, folded by halogen-sulfate-carbonate rocks, where the linkage in GK or BK can be ambiguous. In addition to assessing the physical and mechanical properties, the controlled scratching method can be used to mark out a full-length core — to determine the locations for drilling out standard samples in order to obtain maximum information about the object with a minimum number of studies, and also to search for the most homogeneous zones for drilling out the closest samples for construction of the strength passport.

References

1. Toropetskiy K.V., Kayurov N.K., Cheremisin A.N., Lushev M.A., Samoylov M.I., Ul'yanov V.N., Borisov G.A. Postroenie 1D fiziko-mekhanicheskikh modeley i reshenie zadach ustoychivosti stvola skvazhiny i priskvazhinnoy zony [Construction of 1D physico-mechanical models and solving problems of stability of the wellbore and near-well zone]. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2016, issue 11, 29–41 pp.
2. Toropetskiy K.V., Ul'yanov V.N., Borisov G.A., Kurmangaliev R.Z., Kayurov N.K., Arzhantsev V.S. Obzor petrofizicheskikh zavisimostey dlya postroeniya odnomernykh geologo-geomekhanicheskikh modeley v zadachakh ustoychivosti stvola skvazhiny pri burenii [An overview of petrophysical dependencies for the construction of one-dimensional geological-geomechanical models in the problems of stability of the wellbore during drilling]. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2016, issue 12, 31–44 pp.
3. Germay C., Richard T., Mappanyompa E., Lindsay C., Kitching D., Khaksar A. The Continuous-Scratch Test: A High-Resolution Strength Log for Geomechanical and Petrophysical Characterization of Rocks. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2014, pp. 432–440.
4. Lin J.-S., Zhou Y. Can scratch tests give fracture toughness? Engineering Fracture Mechanics, 2013, issue 109, pp. 161–168.
5. Parshev S.N., Polozenko N.Yu. Mikrotverdost' materialov [Microhardness of materials]. Methodical instructions for laboratory work. Volgograd: Volga State Technical University, 2004, 15 p.
6. Almenara R., Detournay E. Cutting experiments in sandstones with blunt PDC cutters. ISRM Symposium EuRock, 1992, pp. 215–220.
7. Suarez-Rivera R., Stenebrataten J., Dagrain F. Continuous Scratch Testing on Core Allows Effective Calibration of Log-Derived Mechanical Properties for use in Sanding Prediction Evaluation. SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Texas, USA, 2002, 7 p.
8. Richard T. Determination of Rock Strength from Cutting Tests. Master's thesis, University of Minnesota, 1999.
9. Gamwo I.K., Lyons D.K., Lin J.S., Jaime M.C., Finite Element Modeling of Rock Cutting. 44th U.S. Rock Mechanics Symposium, 2010, 7 p.
10. Dagrain F. Influence of the cutter geometry in rock cutting with PDC cutter: an experimental approach. Master's thesis. University of Minnesota, 2001.