

УДК 553.983.076

А. А. РУЛЬКОВ, А. С. ЛЕВИН, В. П. ТЕРРАС

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

A. RULKOV, A. LEVIN, V. TERRAS

PROXIMATE METHOD FOR DIAGNOSING ROCK STRENGTH

Многолетний опыт показал, что изучение физико-механических свойств горных пород с использованием общепринятых методик [1—4] в практике геологоразведочных работ лимитируется большой трудоемкостью этих методов и их высокой стоимостью.

Дальнейшее совершенствование таких исследований невозможно без привлечения неразрушающих (адеструктивных) методов испытаний и соответствующих им средств измерений. Последние, благодаря наличию микропроцессорных систем, позволяют достичь задаваемого уровня и качества статистической информации. Очевидно, что внедрение методов дефектоскопии и автоматизированных средств измерений неразрушающего контроля существенно сократит трудоемкость испытаний. Несомненное преимущество неразрушающих методов заключается в том, что вероятность выводов относительно измеряемых величин всегда можно повысить за счет набора более мощных массивов выборок статистической информации.

Как пример использования неразрушающих методов для диагностики прочностных свойств горных пород в публикуемой статье описано исследование, выполненное с привлечением метода ударного импульса [5, 6]. Средства измерения названного метода — склерометр и аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором, предназначенный для измерения и запоминания информации и ее статистической обработки [7]. Склерометр представляет собой портативный ударный прибор механического действия. Его боек снабжен электрическим преобразователем с ферритовым магнитопроводом.

При ударе индентора склерометра о поверхность исследуемого материала скорость изменения контактного усилия dN/dt преобразуется в электрический сигнал. Физический смысл измеряемого параметра — максимальное значение скорости изменения контактного усилия $U_m = (dN/dt)_{\max}$ в момент упругого внедрения преобразователя в поверхность материала, иными словами — максимальное значение третьей производной от перемещения (рис. 1).

Микропроцессорное устройство дает возможность преобразовывать и одновременно статистически обрабатывать измерительную информацию о прочностных характеристиках исследуемого материала согласно запрограммированным в постоянной памяти операциям. В память аналого-цифрового преобразователя вводят также значе-

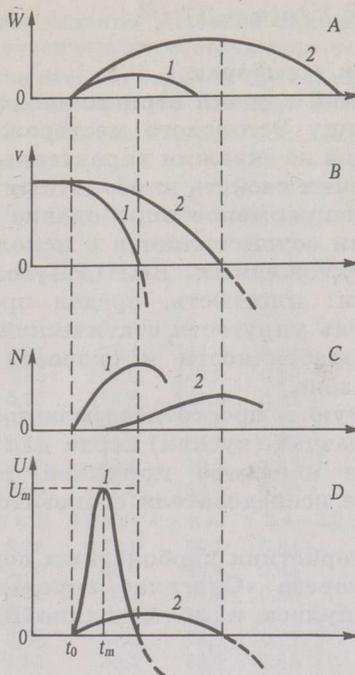


Рис. 1. Ударные характеристики внедрения индентора склерометра в исследуемый материал: А — перемещение W индентора при его внедрении в материал; В — скорость v индентора падает от максимального значения (момент начала контакта) до нулевого (момент остановки индентора); С — усилие N сжатия датчика в процессе удара; U_m — амплитудное значение регистрируемого выходного сигнала в момент t_m удара. В случае 1 прочность материала выше, чем в случае 2

Fig. 1. Impact characteristics of the indentation of the sclerometer indenter into the material tested: А — displacement W of the indenter at its indentation into the material; В — change in speed v of the indenter from the maximum (initial moment of the contact) to zero (moment at which the indenter comes to a stop); С — force N of pressing the transducer in the impact process; D — speed of change in force dN/dt at impact. U_m amplitude value of the output signal of the transducer recorded at the impact moment t_m

ния параметров статической функции преобразования (градуировочной, или тарировочной, зависимости), погрешность ее построения и значения функций влияния.

Индентором наносят удары по исследуемому материалу. Согласно параметрам a и b линейной статической функции преобразования, после каждого замера рассчитывается и выводится на дисплей значение измеряемой прочностной характеристики σ_i (МПа):

$$\sigma_i = (a + bU_m)c,$$

где c — числовое значение функций влияния.

На дисплей выводятся среднее значение $\bar{\sigma}_i$ для определенного числа замеров и коэффициент точности ее оценки m :

$$\bar{\sigma}_i = n^{-1} \sum \sigma_i;$$

$$m = 100 \bar{\sigma}_i^{-1} [\sum (\sigma_i - \bar{\sigma}_i)^2 / n(n-1)]^{1/2},$$

где n — число замеров в выборке.

Объектом исследований служил керн колонковых скважин, вскрывших карбонатную толщу Эстонского месторождения горючих сланцев. Для разреза каждой из скважин характерны значительные вариации физико-механических свойств карбонатных пород.

В последние годы непрерывное опробование керна опорных скважин на месторождении осуществляется с использованием комплекса экспресс-методов, предложенных ВНИГРИуголь [4]. Оцениваются следующие показатели: плотность, предел прочности на растяжение, статический модуль упругости, статический модуль деформации, условная категория пластичности и скорость продольных волн в ультразвуковом диапазоне.

Сложность, а зачастую и просто невозможность повторять замеры на одних и тех же образцах (кусках) керна для уточнения принимаемых рабочих гипотез являются причиной того, что важнейшим инструментом в работе исследователя становятся методы статистического анализа [8].

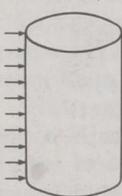
Прочностные характеристики карбонатных пород в разрезе опорной скважины № 0955 разреза «Сиргала» определяли последовательно методом ударного импульса и по методике ВНИГРИуголь [4] (см. табл. 1).

Таблица 1. Схема измерений методом ударного импульса и по методике ВНИГРИуголь [4]

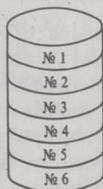
Table 1. Diagram of measurements employing the impact pulse method and using the technique of the VNGRJU [4]

Метод ударного импульса

Определение плотности и предела прочности на растяжение [4]



Определение прочностной характеристики параллельно слоистости по образующей цилиндрической поверхности керна \bar{x}_2^1 (Среднее значение прочностной характеристики и коэффициент ее вариации рассчитывали по каждому десятилетию замерам)



1. Расчленение куска керна на n образцов толщиной 10—20 мм
2. Определение плотности отдельных образцов
3. Определение предела прочности на растяжение перпендикулярно слоистости при помощи пробника БУ-39 (ГОСТ 24941-81) (Средние значения плотности и предела прочности на растяжение, а также коэффициенты их вариации рассчитывали для каждого из кусков керна)

£ -

Примечание. Исследованы все цилиндрические куски керна длиной не менее 100 мм.

Исследуемые породы были подразделены на пять классов по плотности с учетом их литологического состава.

| Класс | Плотность, т/м ³ | Литотип |
|-------|-----------------------------|---|
| I | <1,9 | Горючие сланцы |
| II | 1,9—2,2 | Мергелистый горючий сланец, мергель |
| III | 2,2—2,4 | Глинистый доломит, глинистый доломитизированный известняк |
| IV | 2,4—2,6 | Сильно доломитизированный известняк, доломит |
| V | >2,6 | Доломит |

Таблица 2. Расчет цены деления условной единицы метода ударного импульса с учетом литологического состава породы

Table 2. Calculation of the division value of the conventional unit of the impact pulse method taking into account the lithological composition of the rock

| Номер куска керна | Интервал или индекс слоя (см. рис. 2) | Показатель | | | | Z | Числовые характеристики | | | | |
|---|---------------------------------------|------------|------------------|----------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------|-------|------|
| | | ρ | σ_{\perp} | $\sigma_{\text{сж}}$ | \bar{x}_2^{\parallel} | | Z | D | S | v, % | |
| Карбонатные породы | | | | | | | | | | | |
| Доломит, $\rho > 2,6 \text{ т/м}^3$ | | | | | | | | | | | |
| 26 | I | 2,62 | 3,92 | 78,4 | 111,6 | 0,70 | } $n = 7$ | 0,95 | 0,055 | 0,234 | 24,6 |
| 27 | | 2,71 | 5,35 | 107,0 | 119,9 | 0,89 | | | | | |
| 28 | | 2,74 | 5,93 | 118,6 | 140,4 | 0,84 | | | | | |
| 29 | | 2,70 | 5,03 | 100,6 | 90,8 | 1,11 | | | | | |
| 30 | | 2,65 | 3,29 | 65,8 | 66,9 | 0,98 | | | | | |
| 31 | | 2,62 | 3,48 | 69,6 | 48,8 | 1,42 | | | | | |
| 36 | | 2,62 | 3,88 | 77,6 | 109,7 | 0,70 | | | | | |
| Доломитизированный известняк, $\rho 2,4-2,6 \text{ т/м}^3$ | | | | | | | | | | | |
| 32 | II | 2,58 | 3,73 | 74,6 | 89,1 | 0,84 | } $n = 19$ | 0,70 | 0,027 | 0,164 | 23,4 |
| 33 | | 2,58 | 3,20 | 64,0 | 75,4 | 0,85 | | | | | |
| 34 | | 2,58 | 4,01 | 80,2 | 83,4 | 0,95 | | | | | |
| 37 | | 2,55 | 2,77 | 55,4 | 75,2 | 0,74 | | | | | |
| 38 | | 2,53 | 2,88 | 57,6 | 75,2 | 0,75 | | | | | |
| 39 | III | 2,48 | 1,82 | 36,4 | 68,7 | 0,53 | | | | | |
| 40 | | 2,47 | 1,02 | 38,4 | 63,9 | 0,60 | | | | | |
| 41 | | 2,42 | 1,51 | 30,2 | 47,5 | 0,64 | | | | | |
| 42 | | 2,47 | 1,42 | 28,4 | 43,3 | 0,65 | | | | | |
| 43 | | 2,50 | 2,11 | 42,2 | 80,1 | 0,53 | | | | | |
| 44 | | 2,52 | 1,77 | 35,4 | 78 | 0,45 | | | | | |
| 45 | | 2,55 | 1,8 | 35 | 95,4 | 0,38 | | | | | |
| 46 | | 2,49 | 1,97 | 39,4 | 61,1 | 0,63 | | | | | |
| 47 | | 2,55 | 2,19 | 43,8 | 63,7 | 0,69 | | | | | |
| 48 | | 2,51 | 2,19 | 43,8 | 55,6 | 0,79 | | | | | |
| 78 | IV | 2,54 | 2,52 | 50,4 | 62,2 | 0,81 | | | | | |
| 79 | | 2,55 | 1,52 | 30,4 | 47,6 | 0,64 | | | | | |
| 80 | | 2,53 | 1,97 | 39,4 | 39,6 | 0,99 | | | | | |
| 81 | | 2,52 | 2,2 | 44 | 47,6 | 0,92 | | | | | |
| Горючие сланцы, $\rho < 1,9 \text{ т/м}^3$ | | | | | | | | | | | |
| 52 | H | 1,88 | 1,43 | 22,9 | 38,7 | 0,59 | } $n = 7$ | 0,79 | 0,015 | 0,122 | 15,8 |
| 68 | C | 1,73 | 1,35 | 21,6 | 29,1 | 0,74 | | | | | |
| 63-A | F _{нижн} | 1,72 | 1,40 | 22,4 | 30,4 | 0,73 | | | | | |
| 54 | G | 1,62 | 1,59 | 25,4 | 27,1 | 0,94 | | | | | |
| 74 | A | 1,49 | 1,19 | 19,0 | 26,4 | 0,72 | | | | | |
| 64 | E | 1,39 | 1,47 | 23,5 | 27,1 | 0,87 | | | | | |
| 71 | B | 1,32 | 1,42 | 22,7 | 24,6 | 0,92 | | | | | |

Примечание. ρ — плотность литотипа, т/м^3 ; σ_{\perp} — предел прочности при растяжении, МПа; $\sigma_{\text{сж}}$ — предел прочности на одноосное сжатие, МПа ($\sigma_{\text{сж}}$ пересчитывали по ГОСТ 24941-81 — см. табл. 5 ГОСТа, — где для горючих сланцев $K = 16$ и для карбонатных пород $K = 20$); \bar{x}_2^{\parallel} — прочностная характеристика параллельно слоистости, в условных единицах; Z — цена деления условной единицы метода ударного импульса, МПа; D — дисперсия; S — стандартное отклонение; v — коэффициент вариации, %.

Основные результаты обработки эмпирических данных сведены в табл. 2. Для расчета цены деления условной единицы метода ударного импульса в IV и V классах принятой классификации были выделены четыре литологических интервала карбонатных пород. Кроме того, в качестве литотипа I класса были взяты горючие сланцы, плотность которых равна 1,32—1,88 т/м^3 (рис. 2). Правомерность расчета

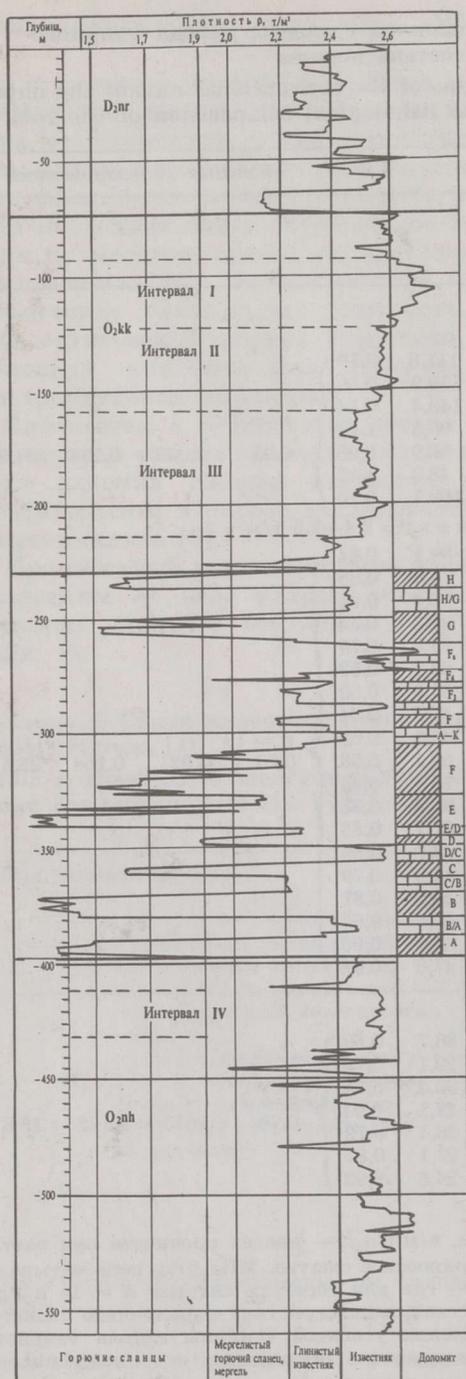


Рис. 2. Диаграмма изменения плотности карбонатных пород по керну опорной скважины № 0955 (разрез «Сиргала»)

Fig. 2. Graph of the density change in the carbonate rock of the core of the main bore-hole (the Sirgala pit)

цены деления условной единицы как частного от деления $\bar{\sigma}_{\text{СЖ}} / \bar{x}_2^{\parallel}$ подтверждается предшествующими исследованиями [9].

При оценке результатов испытаний исходили из предпосылки о наличии корреляционной связи между прочностью и литологическим составом карбонатных пород и их прочностными характеристиками. Установлены значения коэффициентов парной корреляции, вы-

ведены уравнения регрессии между плотностью, пределом прочности на растяжение и пределом прочности на сжатие, определенным при помощи склерометра.

Значения коэффициента корреляции изменяются от 0,61 до 0,91, что подтверждает наличие корреляционной связи (табл. 3). Важный результат исследований — установление тесной корреляции между показаниями склерометра, определенными параллельно слоистости, и значениями предела прочности на растяжение, определенными перпендикулярно слоистости по кускам керна.

Таблица 3. Корреляционные зависимости (число определений $n = 33$)
Table 3. Correlation dependencies (determination number = 33)

| Функция | Коэффициент корреляции | Уравнение регрессии |
|-----------------------------------|------------------------|--|
| $\sigma = f(\bar{\sigma}_p)$ | 0,61 | $\sigma = -1,14/\bar{\sigma}_p + 2,94$ |
| $\sigma = f(\bar{x}_2^y)$ | 0,91 | $\sigma = -38,32/\bar{x}_2^y + 3,1$ |
| $\bar{\sigma}_p = f(\bar{x}_2^y)$ | 0,81 | $\bar{\sigma}_p = 0,0038(\bar{x}_2^y)^2 = 0,00021\bar{x}_2^y + 1,27$ |

Неоспоримым преимуществом метода ударного импульса является а д е с т р у к т и в н а я о ц е н к а прочностной характеристики горных пород, его оперативность и высокая производительность. Применение предлагаемого метода обеспечит принципиально новый подход к изучению прочностной характеристики и динамики ее изменений по керну колонковых скважин.

На наш взгляд, целесообразно разработать новый прибор для а д е с т р у к т и в н о г о к о н т р о л я с фиксацией на информационный носитель результатов замеров, осуществляемых с шагом 5—10 мм по образующей цилиндрической поверхности кусков керна колонковых скважин. Такой подход обеспечит увеличение объемов измерительных массивов, что, в свою очередь, позволит детально проследить за изменчивостью прочностной характеристики горных пород в разрезе.

Определение плотности и ее динамики по длине керна — важное условие при установлении цены деления условных единиц метода ударного импульса. При этом внедрение описанной в [10] установки, использующей гамма-гамма метод, обеспечивает неразрушающую оценку плотности горных пород. Разработка единого приборного комплекса и его внедрение в практику геологоразведочных работ резко сократит трудоемкость изучения физико-механических свойств горных пород в ходе инженерно-геологических исследований.

Достоинство неразрушающих методов заключается в полном сохранении керна при оценке его плотности и прочностных свойств.

SUMMARY

It is necessary to investigate physical-mechanical properties of rocks with non-destructive methods of analysis. Availability of microprocessor systems enable to achieve both a specified level and quality of statistic information. Losses in accuracy by determining the indirect strength characteristics are compensated with a larger sample amount. Besides, the methods of statistic analysis turn out to be of utmost importance for an expert engaged in investigations.

For the first time there are presented the data which were gained upon employing the impact pulse method to non-destructively analyse strength of carbonate rocks deposited in the Estonian oil shale field. The method is featured by

the rate of the contact force variation, the third-order derivative of the travel path, being transformed into electric signal upon an impact against the surface of material under study.

The cut of each individual borehole is characterized by considerable variations in physical-mechanical properties of carbonate rocks. The core samples were subsequently investigated by the impact pulse method and those of proximate analysis, employed for determining density, tensile strength and a number of other characteristics.

The most prominent result of the investigations performed was the establishing of a close correlaton between the impact pulse indirect charateristics (parallel to rock stratification) and the tensile strength (perpendicular to stratification).

A new complex of the measuring techniques and instrumentation presumes fixing of each particular measurement onto an information carrier with a spen of 5 to 10 mm along the element of the core cylinder surface. This enables to increase the content of the measurement arrays and to trace in detail the variation of rocks within the cut. The impact pulse method is efficiently employed provided that the parallel determination of density and the dynamic of its variation is carried out along the core sample. Density is non-destructively evaluated by the employed γ - γ method.

Uniting of the non-destructive diagnosis of density and strength characteristics into a single complex of the measuring techniques and instrumentation alongside the implementing that into the geological prospecting enable to increase drastically the efficiency and information content of the latter. The diagnosis method proposed is advantageous in preserving the core sample intact by the non-destructive assessment of density and strength characteristics.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания по определению механических свойств горных пород геологическими и изыскательскими организациями Министерства угольной промышленности СССР/ВНИМИ. — Л., 1977.
2. Требования к определению механических свойств горных пород при геологическом изучении полей шахт Министерства угольной промышленности СССР (при разведке, строительстве, реконструкции и эксплуатации) / ВНИМИ. — Л., 1977.
3. Методика отбора проб и определения физико-механических свойств горных пород / ИГД им. А. А. Скочинского. — М., 1984.
4. Методические указания по применению экспресс-методов и технических средств определения физико-механических свойств углевещающих горных пород в процессе бурения / ВНИГРИУголь. — Ростов-на-Дону, 1985.
5. ГОСТ 22690-88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. 1990.
6. Рувльков А. А., Левин А. С., Террас В. П. К вопросу о повышении надежности строительных конструкций на подрабатываемых территориях // Научно-технический прогресс в технологии строительных материалов : Тез. докл. / КазЦНИТИС. Алма-Ата, 1990.
7. Саммал О. Ю., Рувльков А. А., Тальберг П. Л. Склерометрический магнитоупругий метод для определения прочности бетона // Бетон и железобетон. 1983. № 2. С. 42—44.
8. Левин А. С. Инженерно-геологическое изучение и прогнозная оценка состояния массива на сланцевых шахтах Прибалтийского бассейна // Инж. геол. 1990. № 5. С. 83—92.
9. Розанов Ю. А. Влияние макроструктурных особенностей горных пород на анизотропность их механических свойств // Тр. Ин-та геол. АН СССР. 1952. Петрогр. сер. (№ 42). Вып. 146. С. 70—75.

10. Установка для экспресс-анализа вещественного и структурного состава горных пород методом узкого пучка гамма излучений : Рекламный проспект «Международная отраслевая выставка «Уголь-90». Донецк, 1990.

*Научно-исследовательский институт
строительства Эстонской республики
г. Таллинн*

*Эстонский филиал Института
горного дела им. А. А. Скочинского
г. Кохтла-Ярве*

*Scientific Research Institute
of Construction of the Estonian Republik
Tallinn*

*Estonian Affiliate of A. A. Skotchinsky
Mining Institute
Kohhtla-Järve*

*Представил В. М. Ефимов
Поступила в редакцию
5.05.91*

*Presented by V. Yefimov
Received 5.05.91*