УДК 622.831 (043.3)

А.Т.КАРМАНСКИЙ, *канд.техн. наук, ст. научный сотрудник, kaf.sgp @ mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*)

A.T.KARMANSKY, *PhDr. tech. Sci, Senior Research Fellow, kaf.sgp @ mail.ru*
Saint-Petersburg State Mining Institute (*Technical University*)

КОЛЛЕКТОРСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Представлены результаты исследований по влиянию вида напряженного состояния, циклического нагружения и времени выдержки образцов под нагрузкой на характер изменения пористости и проницаемости. Установлено, что сжимаемость горных пород пропорциональна пористости, а с ростом приложенного напряжения сжимаемость убывает по экспоненциальной зависимости.

Ключевые слова: напряженное состояние, циклическое нагружение, пористость, проницаемость, сжимаемость, известняк, песчаник, нефтяное месторождение.

COLLECTING PROPERTIES OF ROCKS IN CHANGES OF STRESS STATE TYPE

The article presents the results of investigations of the influence of stress state form, cyclic loading and time of bearing specimens under loads on the pattern of changes in porosity and permeability. It was stated that compressibility of rocks is proportional to porosity, and with rise of applied stress the compressibility decreases exponentially.

Key words: stress state, cyclic loading, porosity, permeability, compressibility, limestone, sandstone, oil field.

Введение. Изменение напряженного состояния массива горных пород, вызванное проходкой горных выработок различного назначения, естественно, приводит к изменению коллекторских свойств (пористости, проницаемости) пород вокруг выработки. Изменение коллекторских свойств определяет способность горных пород отдавать или принимать жидкий флюид, что определяет либо приток флюида в выработку (скважину), либо приемистость пород при проведении работ, связанных со вторичными методами отработки нефтяных месторождений (нагнетание воды в продуктивный пласт с целью поддержания пластового давления), с региональным увлажнением массива горных пород при региональных мерах борьбы с динамическими явлениями на угольных шахтах.

Значительный экспериментальный и теоретический материал по сжимаемости горных пород при высоких значениях давления приведен в грунтоведении и механике грунтов*. Однако там наибольшее внимание уделялось сжимаемости глинистых грунтов, в то время как сжимаемость горных пород не изучалась.

В связи с этим проводились исследования по выявлению влияния вида напряженного состояния, циклического нагружения и времени

* Грунтоведение / Под ред. Е.М.Сергеева. М.: Изд-во МГУ, 1971. 576 с.

Ground science / Edited by E.M.Sergeev. M.: MSU, 1971. 576 p.

Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения / Под редакцией А.И.Берона. М.: Недра, 1983. 296 с.

Rock properties under different kinds and modes of loading / Edited by A.I.Beron. M.: Nedra, 1983. 296 p.

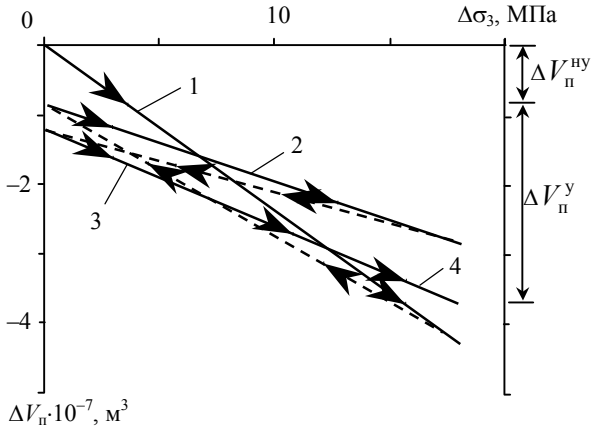


Рис.1. Уменьшение объема пор образцов известняка $\Delta V_п$ при циклическом нагружении (Тенгизское месторождение):

1-4 циклы нагружения образцов;

$\Delta V_п^у$ – упругая деформация; $\Delta V_п^{іб}$ – неупругая деформация пор в образце породы

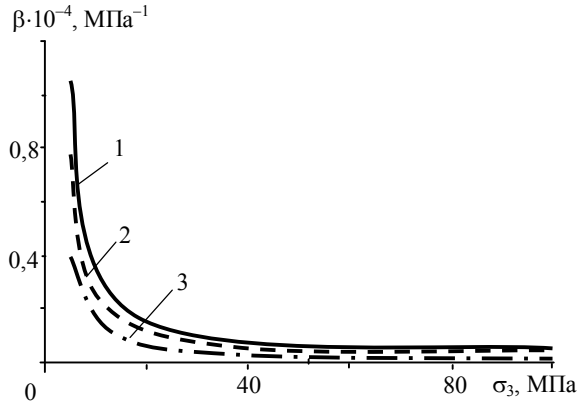


Рис.2. Зависимость объемной сжимаемости β от давления σ_3 для образцов известняка пористостью:

1 – $m \le 3$ %; 2 – $3 \le m \le 8$ %; 3 – $m \ge 10$ %

выдержки образцов под нагрузкой на характер изменения пористости и проницаемости.

Анализ результатов проведен на основании экспериментальных данных, полученных на образцах известняка Тенгизского нефтяного месторождения, в связи с тем, что в керновом материале известняка, при наличии структурных нарушений в виде трещин, пропластков других пород, присутствовали все три вида пористости, а именно: трещинная ($m < 3$ %); трещиновато-поровая ($3 < m < 8$ %); поровая ($m > 8$ %). Аналогичные результаты по изменению пористости и сжимаемости при увеличении давления всестороннего сжатия были получены на образцах выбросо- и невыбросоопасных песчаников (Донбасс), высокопористом кварцевом песчанике и других породах.

Методика проведения исследований. Цикличность нагружения образцов пластовой нагрузкой до 18 МПа создавалась по следующей схеме: 1-й цикл – $\sigma_3 = 18$ МПа, время выдержки 1 сут; 2-й цикл – $\sigma_3 = 0 \div 18$ МПа, время выдержки 4 ч; 3-й цикл – $\sigma_3 = 0 \div 9$ МПа, время выдержки 2 ч; 4-й цикл – $\sigma_3 = 9 \div 18$ МПа, время выдержки 4 ч.

Исследования объемной сжимаемости β от давления всестороннего сжатия σ_3 и эффективного давления $\sigma_{эф} = \sigma_3 - P_п$, где $P_п$ – поровое давление, выполнялись при граничных условиях по давлению $\sigma_3 = 100$ МПа, $P_п = 80$ МПа. С целью изучения влияния только давления всестороннего сжатия и сжатия при эффективном давлении $\sigma_{эф} = \sigma_3 - P_п$ из одного и того же керна изготовляли как минимум два образца. При этом один образец испытывали в условиях всестороннего сжатия $\sigma_3 = 100$ МПа. Граничным условием для второго образца было $\sigma_3 = 100$ МПа и $P_п = 80$ МПа с последующим снижением порового давления до нуля. Для того, чтобы исключить влияние поверхностно-активных веществ на деформационные характеристики горных пород, поровое давление создавалось инертным газом азотом.

Анализ результатов. После первых двух циклов нагружения остаточная деформация объема порового пространства образца составила 36 % от полной деформации (рис.1). При циклическом нагружении образцов породы образуются петли гистерезиса, по которым можно определить модуль гистерезиса $E = \mathrm{ctg}\alpha$, где α – угол наклона петель к оси абсцисс. При многократном повторном приложении сжимающей нагрузки до одного и того же значения давления всестороннего сжатия σ_3 происходит уплотнение образца породы, после которого при последующих циклах нагружения проявляются упругие деформации.

Типичная зависимость объемной сжимаемости β от давления всестороннего сжатия σ_3 при разных значениях пористости приведена на рис.2.

Наибольшие различия объемной сжимаемости однотипных образцов (изготовленных из одного керна) наблюдаются в области давлений 0-20 МПа в зависимости от вида испытаний. Так, коэффициент сжимаемости, определенный при нагружении одновременно всесторонним и поровым давлением ($P_п = 0{,}8\sigma_3$), значительно выше, чем при давлении всестороннего сжатии. С увеличением давления всестороннего сжатия выше 20 МПа различия между коэффициентами сжимаемости практически не зависят от давления всестороннего сжатия.

С ростом пористости коэффициент сжимаемости уменьшается. Для образцов с разной пористостью коэффициент сжимаемости зависит от давления всестороннего сжатия, особенно при их изменении в диапазоне от 0 до 20 МПа. При напряжении свыше 20 МПа коэффициенты сжимаемости не зависят от пористости и определяются чисто упругими деформациями.

Для образцов с пористостью $m \geq 10\,\%$ отмечается слабая зависимость коэффициента проницаемости $K_{пр}$ от давления всестороннего сжатия σ_3 (рис.3). Наибольшее влияние на изменение коэффициента проницаемости с ростом напряженного состояния проявляется на образцах с трещинно-поровой и трещиноватой структурой порового пространства.

Найденная методом наименьших квадратов аналитическая зависимость относительного изменения пористости при циклическом нагружении и сжатии всесторонним давлением σ_3 имеет вид

$$\frac{\Delta m(\sigma_3)}{m_0} = 5{,}16 + 1{,}6m_0\,, \qquad (1),$$

где $\Delta m(\sigma_3) = m_0 - m(\sigma_3)$ – изменение пористости при сжатии всесторонним давлением σ_3; m_0 – начальная пористость ненагруженного образца; $m(\sigma_3)$ – пористость образца при сжатии.

Среднеквадратическое отклонение результатов определений пористости при напряженииивыше 20 МПа от рассчитанных по уравнению (1) составляет 30 %. Такое расхождение может быть обусловлено изменчивостью структуры порового пространства и минерального состава породы при постоянной пористости.

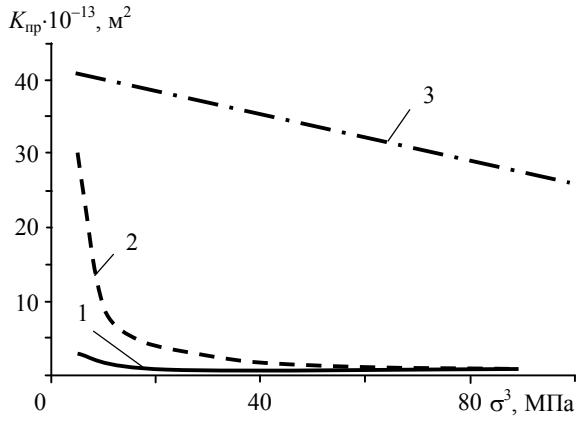


Рис.3. Зависимость коэффициента проницаемости $K_{пр}$ от давления σ_3 для известняка

Условные обозначения см. рис. 2

На основании экспериментальных данных установлено, что кривые распределения сжимаемости (см. рис.2) от пористости внешне похожи на кривые, полученные для соотношения деформации и приложенной нагрузки. Для их аппроксимации удобна логарифмическая или экспоненциальная форма осредняющих кривых.

Для сцементированных горных пород зависимость сжимаемости от пористости может быть определена как

$$\beta_i(m) = \beta_0 - km\,, \qquad (2)$$

а при каком-либо $m = \text{const}$ зависимость сжимаемости от вида напряженного состояния может быть определена как

$$\beta_i(\sigma_3) = \beta_i(m)\exp(-k_1\sigma_3)\,. \qquad (3)$$

Здесь β_0 – значение коэффициента сжимаемости при давлении всестороннего сжатия $\sigma_3 \geq 0{,}5$ МПа; k, k_1 – коэффициенты пропорциональности.

Зависимость коэффициента сжимаемости от пористости и напряженного состояния может быть определена при совместном решении зависимостей (2) и (3) и представлена уравнением

$$\beta_i(m,\sigma_3) = (\beta_0 - km)\exp(-k_1\sigma_3)\,. \qquad (4)$$

Анализ результатов исследований и петрографического описания позволяет сделать вывод, что с ростом давления всесто-

роннего сжатия характер деформирования образцов горных пород с различным типом порового пространства различен, т.е. трещины закрываются в первую очередь, а деформация скелета происходит менее значительно, что и регистрируется по коэффициентам объемной сжимаемости. Остаточная, или необратимая, деформация горных пород обусловлена смещением друг относительно друга зерен породы, в результате чего структурные связи между ними нарушаются и зерна располагаются более плотно. Обратимая деформация горных пород определяется упругими деформациями зерен породы.

Таким образом, экспериментально установлено, что сжимаемость горных пород пропорциональна пористости, а с ростом приложенного напряжения сжимаемость убывает по экспоненциальной зависимости. Породы с трещинной структурой порового пространства наиболее чувствительны к изменению напряженного состояния. Сжимаемость пустых трещин нормально их плоскости может достигать сжимаемости газов.