

МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК624.151.1

А. М. Самедов

В. И. Охрименко

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
КВАЗИ-ОДНОФАЗНОГО МАССИВА ИЗ МАЛОПРОЧНОЙ
СЛАНЦЕВОЙ ПОРОДЫ ПРИ СЖАТИИ

НГУУ «КПИ» им. И. Сикорского

Рассмотрено напряженно-деформированное состояние при сжатии квазиоднофазного массива состоящего из выветренных малопрочных сланцевых пород.

Определены деформирования образцов из малопрочных сланцевых пород в виде формоизменения и объемных деформаций при сжатии в компрессионном приборе (одометр) и в 3-х осном приборе (стабилометр).

Предложены зависимости деформации формоизменения ε_f , зависящие от изменений напряжений σ_i , модуля сдвига G , от структурной прочности P_{str} и вязкости $\nu(t)$. Так же предложены зависимости объемных деформаций, зависящие от величины объемных напряжений σ_v , от структурной объемной прочности P_{str} , V и от модуля объемной деформации E_v .

Даны совместные решения уравнений формоизменений и объемных деформаций.

Ключевые слова: Уплотнение малопрочных сланцевых пород, формоизменения, объемные деформации, компрессионные сжатия, напряжения, вязкость, боковые давления, структурная прочность.

Вступление

Часто в инженерной практике встречается массив состоящий из малопрочных сухих сланцевых пород. Еще Герееванов Н. М. разделил горную породу по влажности грунтов на 3 фазы: сухая-однофазная, водонасыщенная – 2-х фазная; часть поры заполнена водой, а часть воздухом – 3-х фазная. Выветренные сланцевые породы могут быть однофазными, 2-х и 3-х фазными.

Результаты исследований

В некоторых литературных источниках [1÷7] приведены физико-химические свойства жидких и твердых инженерных характеристик сланцевых горных пород. В этих источниках приводятся наиболее прочные и водостойкие сланцевые породы. А также, приводятся реологические свойства сланцевых пород. Не затронуто малопрочные выветренные сланцевые породы и свойства их уплотнения при сжатии.

Рассмотрим сухие квазиоднофазные массивы, которые при сжатии могут одновременно деформироваться в виде **формоизменения и объемного сжатия**. В таких случаях при сжатии в массиве протекает напряженное состояние, которая изменяет вязкость ν во времени t , т.е. $\nu(t)$ и модуля сдвига G , изменяется деформация **формоизменения** ε_f в следующем виде:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_i}{G} + \frac{(\sigma_i - P_{str})^n}{\nu(t)} \quad (1)$$

где σ_i – изменения нормальных напряжений; $\nu(t)$ – изменение вязкости во времени; P_{str} – структурная прочность при всестороннем сжатии ступенчатой нагрузкой с малым нарастанием (примерно 0,01 МПа), существуют до определенной величины от ступенчатых нагрузок (давлений) грунт или порода практически не деформируются – это характеризует структурную прочность данного материала.

$$P_{str} = (\sigma_{cp} + P_s) \operatorname{tg} \varphi \quad (2)$$

где σ_{cp} – среднее значение напряжений от ступенчатой нагрузки; P_g – давление связности: $P_g = c \cdot \text{ctg} \varphi = \frac{c}{\text{tg} \varphi}$; c – сила сцепления, φ – угол внутреннего трения; n – коэффициент нелинейности, определяется опытным путем, $n < 1$.

При сжатии квазиоднофазного малопрочного массива из сланцевых пород протекает деформация **объемного изменения** ε_v , которые при небольшом диапазоне изменений напряжений выражается:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E_{v_1}} + \frac{\sigma_v - P_{str,v}}{E_{v_2}} \quad (3)$$

где E_{v_1} и E_{v_2} – модули упругого и пластического деформирования при объемном сжатии, соответственно, при напряжениях $\sigma_v < P_{str,v}$ и при $\sigma_v > P_{str,v}$; $P_{str,v}$ – структурная прочность сланцевых пород малой прочности при всестороннем сжатии.

Если известно, модули деформации малопрочной сланцевой породы (примерно, $E_0 = 12 \div 20$ МПа) и коэффициент Пуассона ($\mu_0 = 0,22 \div 0,3$), тогда модули сдвига G можна вычислить: $G = E_0 / 2(1 + \mu_0)$.

Для решения практических задач можна принимать следующие параметры при малопрочных выветренных сланцевых породах, на примере глинистых сланцев или песчано-глинистых сланцев: удельный вес частицы $\gamma_f = 23,6 + 25,8$ кН/м³; удельный вес $\gamma = 13,6 + 15,4$ кН/м³; сила сцепления $c = 0,024 \div 0,028$ МПа; угол внутреннего трения $\varphi = 14^\circ 30' + 16^\circ 20'$; модуль деформации $E_0 = 13,2 + 16,4$ МПа; модуль сдвига $G = 0,57 \div 0,7$ МПа; модуль всестороннего сжатия $K = 10,4 \div 13,2$ МПа.

Если пренебречь реологическими свойствами при объемном деформировании квазиоднофазного массива из малопрочных сланцевых пород, так как реологические свойства здесь мало изменяются, тогда при большом диапазоне изменения напряжений выражение (3) получает вид:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v - P_{str,v}}{E_v} \quad (4)$$

Воспользуемся состоянием $\sqrt{3}\varepsilon_1(t) = 2\varepsilon_v(t) = 2\varepsilon_1(t)$ вытекающие из геометрических условий компрессионного сжатия (т.е. сжатие на приборе одометр, без бокового расширения), а также зависимостей:

$$\sigma_1 = P - \sigma_2(t) \quad (5)$$

где $\sigma_2(t)$ – боковое давление:

$$\sigma_2(t) = \frac{\sigma_v(t)}{3} = \frac{P + 2\sigma_2(t)}{3} \quad (5')$$

вытекающими из известных обозначений для интенсивности вертикальных напряжений $\sigma_1(t)$ и среднего напряжения σ_{cp} .

Здесь P – уплотняющее давление от нагрузок при сжатии образцов изготовленных из малопрочных сланцевых пород; $\sigma_2(t)$ – боковое давление во времени t . При совместном решении уравнений деформаций формоизменением (1) и уравнений объемной деформации (4) получим дифференциальное уравнение следующего типа:

$$\frac{d\sigma_2}{(a_1 - \sigma_2 b_2)^n} = \frac{dt}{3^n c_1 v(t)} \quad (6)$$

где $a_1 = P(3 - \text{tg} \varphi) - 3P_g \text{tg} \varphi$; $b_1 = 3 - 2 \text{tg} \varphi$; $c_1 = \frac{4}{3\sqrt{3}} + \frac{1}{c}$;

$$E_v = \frac{E_{v_1} \cdot E_{v_2}}{E_{v_1} + E_{v_2}} \quad (7)$$

В частном случае, когда $n=1$ $v(t) = v_{\infty} - (v_{\infty} - v_0) \exp(-vt)$, боковое давление $\sigma_2(t)$ во времени t определяется:

$$\sigma_2(t) = \frac{a_1}{b_1} + \frac{\exp(-\frac{b_2 t}{3c_1 v_{\infty}})}{b_1} \cdot \frac{[b_2 \sigma_2(t_2) - a_1]}{[v_{\infty} - (v_{\infty} - v_0) \exp(-vt)]^{3c_1 v_{\infty}}} \cdot \frac{b_2}{b_1} \quad (8)$$

Следует отметить, что хотя мы принимаем для расчета массива из малопрочных сухих сланцевых пород в сыпучем или выветренном виде как в квазиоднофазном виде, но в реальном природном состоянии они имеют структурно связанную и пленочную воду, что придает породам вязкость и связность в массиве. Для практических расчетов можно принимать вязкость

малопрочных сланцевых пород $\nu_0 = 2 \cdot 10^2 \text{Па} \cdot \text{с} + 4 \cdot 10^2 \text{Па} \cdot \text{с}$. В случае изменения коэффициента вязкости ν пропорционально времени t , т.е. $\nu(t) = \nu_0 + \nu \cdot t$ боковое давление получает вид:

$$\sigma_2 t = \frac{a_1}{b_1} + \frac{b_1 \sigma_2(t) - a_1}{b_1} \cdot \left(\frac{\nu_0}{\nu_0 + \nu t} \right)^{\left(\frac{b_1}{3 \sigma_2 \nu_0} \right)} \quad (9)$$

Если вязкость в массиве имеет постоянную величину, т.е. $\nu = \nu_{\infty} = \text{const}$ (коэффициент вязкости определяется $\nu_{\infty} = 1/\nu$), тогда боковое давление будет иметь вид:

$$\sigma_2(t) = \frac{a_1}{b_1} + \frac{b_1 \sigma_2(t_1) - a_1}{b_1 \nu} \exp\left(-\frac{b_1}{3 \sigma_2 \nu}\right) \quad (10)$$

Из (8) и (10) видно, что начальное и конечное значение бокового давления $\sigma_2(t)$ во времени во всех случаях совпадают, но промежуточные его значения различны, что обусловлено характером изменения коэффициента вязкости $\nu_{\infty}(t)$ во времени.

Для определения начального значения бокового давления следует исходить из упругого состояния, так как в начальный момент в массиве из малопрочных сланцевых пород в сухом виде еще не успела протекать деформация в виде вязко-пластичности или пластичности, а только происходят упругие деформирования в соответствии с модулем объемного сжатия E_v и модулем сдвига G , т.е.

$$\sigma_2(\tau) = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0} P = \xi_0 P \quad (11)$$

где μ_0 – коэффициент начального поперечного расширения при одноосном сжатии в упругой стадии деформации или коэффициент Пуассона $\mu_0 = 0,3$; $\xi_0 = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}$ – коэффициент бокового давления.

Конечное значение бокового давления $\sigma_2(t)$ легко можно определить при $t \rightarrow \infty$, т.е.:

$$\sigma_2(t \rightarrow \infty) = \frac{a_1}{b_1} = \frac{P(3 - \text{tg}\varphi) - Pe \cdot \text{tg}\varphi}{3 - 2\text{tg}\varphi} \quad (12)$$

где φ – угол внутреннего трения породы, измеряется рад.

Если давление $P \leq P_{str}$, то боковое давление равно начальному значению и определяется по формуле (11); если $P > P_{str}$, то определяется по формуле (12). Величину P_{str} легко определить при $P > P_{str}$, полагая $\sigma_2(t \rightarrow \infty) = \sigma(\tau_1)$, т.е.:

$$P_{str} = 3Pe \cdot \text{tg}[\varphi] [3(1 - \xi_0) - \text{tg}\varphi(1 - 2\xi_0)] \quad (13)$$

Справедливость решения (13) можно проверить экспериментальными исследованиями в приборе трехосного сжатия (прибор – стабилометр) в режиме компрессии с измерением бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$ и построение зависимости бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$ от уплотняющего давления P (рис.1) и зависимости деформации ε_1 от P .

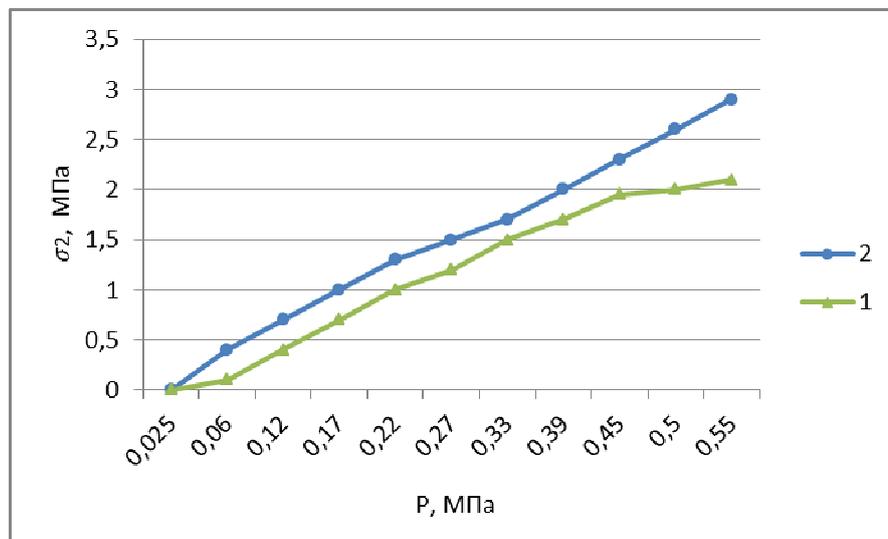


Рис. 1а. Зависимость бокового давления σ_2 от уплотняющего давления (P) в режиме компрессионного сжатия: 1 – кривая условно-мгновенного нагружения; 2 – кривая длительного нагружения $t = 12$ сут

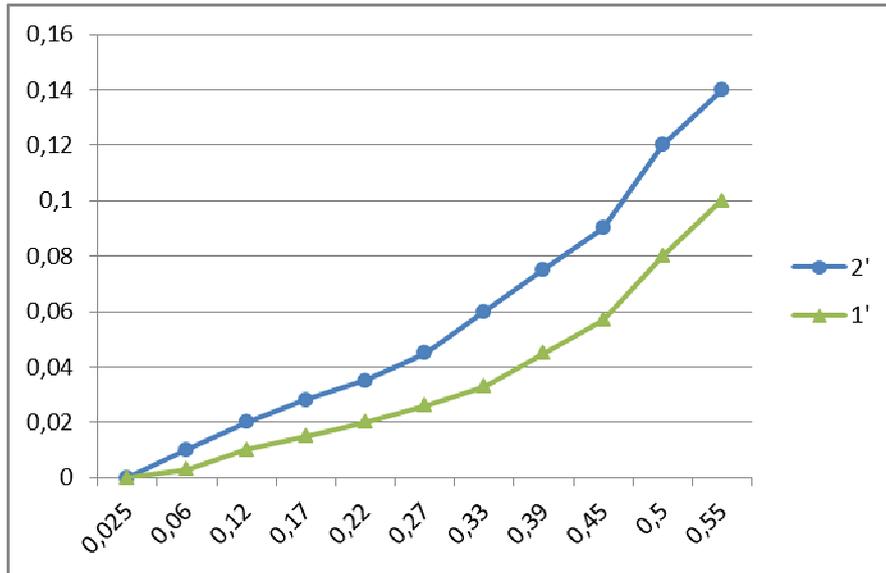


Рис. 16. Зависимость бокового давления σ_2 и вертикальной деформации ε_1 в режиме компрессионного сжатия: 1' – кривая условно-мгновенного нагружения; 2' – кривая длительного нагружения $t = 12$ сут

На рис. 1а видно, что боковое давление $\sigma_2 = \sigma_3$ и вертикальное давление $\sigma_1 = \frac{N_1}{F}$ (где N_1 – действующая ступенчатая нагрузка; F – площадь поперечного сечения образцов) и вертикальная деформация ε_1 до преодоления величины структурной прочности ($P_{стр}$) компрессионного сжатия практически отсутствует т. е. индикаторы часового типа измерительного прибора их не показывают (рис. 1б).

Показатели образцов завернутых в водозащитную пленку и испытанных в приборах (стабилометре) трехосного сжатия и сжатия-растяжения при различных значениях боковых давлений $\sigma_2 = \sigma_3 = \text{const}$, сопоставлены с параметрами сжатия на одомере (компрессионном приборе) и определена их сходимость (рис. 2)

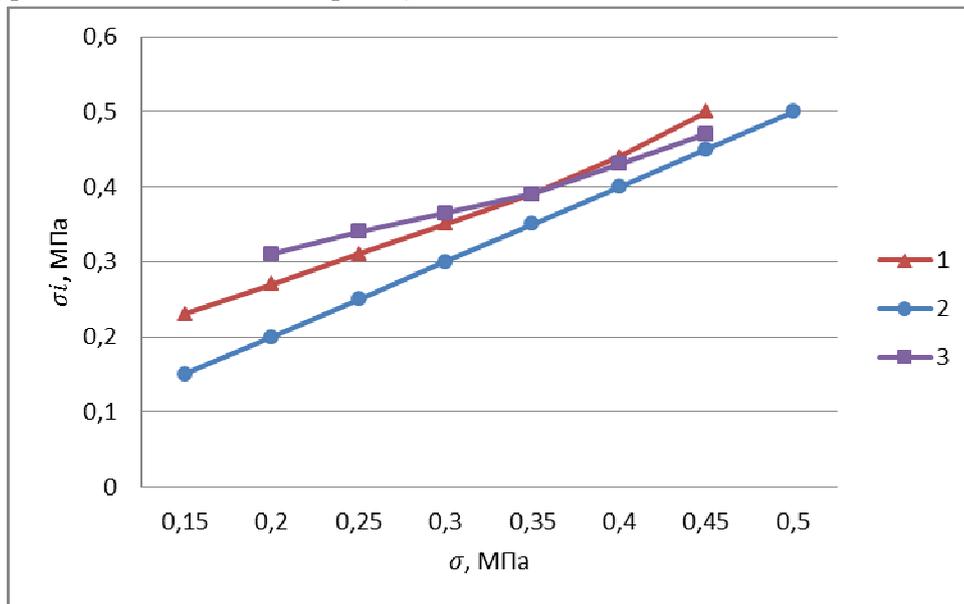


Рис. 2. Сопоставление данных трехосного σ_i , МПа и компрессионного σ , МПа, сжатия

В результате сравнения в плоскости $\sigma_i \sim \sigma$, оказалось, что предельные прямые $\sigma_i = (P_s + \sigma) \text{tg} \varphi$, построенные по результатам данных 3-осного сжатия и сжатия-растяжения (на стабилометре), и зависимость $\sigma_i = f(\sigma)$, построенная по данным компрессионного сжатия (на одомере-компрессионном приборе) очень близкие. Это показывает, что параметры длительной прочности сланцевой малопрочной породы в сухом виде находящиеся в массиве могут быть

определены по результатам испытаний в условиях компрессионного сжатия при замере бокового давления во времени или в условиях 3-осного сжатия на стабилометре.

Использование нелинейных уравнений состояния скелета массива (1) и (4) для формоизменения и объемного уплотнения для решения одномерной задачи уплотнения, как квази-однородный малопрочный сухой массив можна решить, как решение задач в компрессионном сжатии. Здесь можна параметр Надан-Лоде принимать постоянным, т. е. $\lambda_s = -1 = \text{const}$.

Параметр Надан-Ладе характеризует работу массива в сложном напряженном состоянии: 2-х – осном, 3-х – осном и объемно-напряженном состоянии. Например, параметр Надан-Ладе для хрупких материалов, таких как стекло, керамика, малопрочные сланцевые породы при нагружении продольной растягивающей силой и внутренним давлением или при совместном растяжении и кручении или при сжимающей силе и внутренним растягивающим давлением этот параметр имеет линейную зависимость:

$$\lambda_\sigma = \lambda_\varepsilon = -\sqrt{3} \cdot \text{ctg} \left(\psi_s + \frac{\pi}{3} \right)$$

где ψ_s – пределы изменения угла вида деформированного состояния, являются такими же, как пределы изменения угла вида напряженного состояния, т.е. могут быть применены в пределах $0 \leq \psi_s \leq \frac{\pi}{3}$. Параметр Надан-Лоде ($\lambda_\sigma = \lambda_\varepsilon$) характеризует, что для всех напряженных состояний, круговые диаграммы напряжений и деформаций подобны – это вытекает из II гипотезы теории упруго-пластических деформаций; K_σ – параметр траектории нагружения.

Выводы

- Сланцевые породы бывают очень разнообразными (более 12 видов); часть из них может быть в выветренном виде, в рыхлом или малопрочном и в сухом состоянии, поэтому при сжатии могут деформироваться, изменять свои формы, объемы и находиться в напряженно-деформированном состоянии в основаниях сооружений. В таком виде они не пригодны, как основания сооружений и требуют усиления.
- Усилить можно с химическими закреплениями (силикатизацией или смолизацией).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герсеванов Н. М., Польшин Д. Е. Теоретические основы механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1948 - 250с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1973. – 286 с.
3. Самедов А. М. Расчет и проектирование геотехнических инженерных сооружений (монография). НТУУ «КПИ», г. Киев – 2013. – 806 с.
4. Кемеров Д. К. Физико-химические свойства жидких сланцевых и каменноугольных продуктов. Л. Госстройиздат, 1951. – 86 с.
5. Воробьев В. А. Строительные материалы. Издательство «Высшая школа», М.: - 1973. – 275 с.
6. Самедов А. М. Miroclaw Gurdek, Nowakowska A. Инженерные характеристики некоторых сланцевых горных пород. Miedzynazodnowa Konferencja VIII Szkoła Geomechaniki, 2007. 16-19 Pazdzieznika, Gliwice – Ustron (Польша). – с. 253-261.
7. Самедов А. М., Жданова Е. А. Исследование реологических свойств сланцевых горных пород. ГУ Академия горных наук. Международная Академия наук. Экология и безопасность жизнедеятельности. 3-я Международная Конференция по проблемам рационального природопользования, г. Тула, 8-10 июня 2010 г. – с. 24-30.

Самедов Ахмед Меджид-оглы – д-р техн. наук, профессор кафедры «Геостроительства и горных технологий».

Охрименко Валентина Ивановна – магистр кафедры «Геостроительства и горных технологий».

A. Samedov

V. Ohrimenko

TENSELY-DEFORMED STATE OF A QUASI-SINGLE PHASE MASSIVE FROM A SMALL-SURFACE SLATE BREED AT COMPRESSION

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

The stress-strain state under compression of a quasi-one-phase array consisting of weathered low-strength shale rocks is considered.

The deformation of samples from low-strength shale rocks in the form of deformation and volume deformations during compression in a compression instrument (odometer) and in a 3-axis instrument (stabilometer) was determined.

Dependences of the deformations ϵ_f depend on the stress changes σ_i , the shear modulus G , on the structural strength P_{str} , and on the viscosity $v(t)$. The dependences of the volume deformations depending on the volumetric stresses σ_v on the structural bulk strength P_{str} , V and on the volume deformation modulus E_v are also proposed.

Joint solutions of the equations of shape changes and volume deformations are given.

Keywords: sealing of low-strength shale rocks, deformations, volumetric deformations, compression compressions, stresses, viscosity, lateral pressures, structural strength.

Samedov Ahmed Medgyd ogly - Professor of the Department of "Geostructures and mining technologies".

Ohrimenko Valentyna Ivanivna - Master of the Chair of "Geostructures and mining technologies".

А. М. Самедов

В. І. Охріменко

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КВАЗІ-ОДНОФАЗНОГО МАСИВУ З МАЛОМІЦНОЇ СЛАНЦЕВОЇ ПОРОДИ ПРИ СТИСНЕННІ

НТУУ «КПІ» ім. І. Сікорського

Розглянуто напружено-деформований стан при стисканні квазіоднофазного масиву, що складається з вивітрених маломіцних сланцевих порід.

Визначено деформування зразків з маломіцних сланцевих порід у вигляді формозміни і об'ємних деформацій при стисненні в компресійному приладі (одомер) і в 3-х осном приладі (стабіломер).

Запропоновані залежності деформації формозміни ϵ_f що залежать від змін напруг σ_i , модуля зсуву G , від структурної міцності P_{str} і в'язкості $v(t)$. Так само запропоновані залежності об'ємних деформацій, що залежать від величини об'ємних напруг σ_v , від структурної об'ємної міцності P_{str} , V і від модуля об'ємної деформації E_v .

Дано спільні рішення рівнянь формозмін і об'ємних деформацій.

Ключові слова: Ущільнення маломіцних сланцевих порід, формозміни, об'ємні деформації, компресійні стиснення, напружений стан, в'язкість, бічний тиск, структурна міцність.

Самедов Ахмед Меджид-огли – д.т.н, професор кафедри «Геобудівництва та гірничих технологій».

Охріменко Валентина Іванівна – магістр кафедри «Геобудівництва та гірничих технологій».