

УДК 622.023

© А.В. Халимендик, А.Н. Шашенко, В.Г. Шаповал, А.В. Солодянкин,
Г.Г. Сторчак

ТРАНСФОРМАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ПРОЧНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ НАЛИЧИИ В ПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

© O. Khalymendyk, V. Shapoval, O. Shashenko, O. Solodiankin, G. Storchak

TRANSFORMATION CRITERIA ROCK STRENGTH IN THE PRESENCE OF EXCESS PORE FLUID PRESSURE

Мета. Встановити, яким чином відомі критерії міцності та стійкості гірських порід трансформуються при наявності в поровій рідині надлишкового тиску і на основі аналізу отриманих рішень класичних задач механіки ґрунтів виконати оцінку впливу порового тиску на критичну висоту вертикального укосу.

Методика дослідження. Теоретичні дослідження геомеханічних процесів з використанням аналітичних математичних методів. Аналіз і узагальнення результатів теоретичних досліджень.

Результати дослідження. Отримано модифікації відомих критеріїв міцності Мора – Кулона, Бенявського, Хоека – Брауна, що дозволяють при визначенні міцності гірських порід виконувати облік наявності в поровій рідині надлишкового тиску. Виконано зіставлення критичної висоти вертикального укосу, а також активного і пасивного тиску водонасичених і неводонасичених гірських порід. Отримані результати допускають природне узагальнення на гірські породи в яких під надлишковим тиском знаходиться поровий газ. Зроблено висновок про те, що всі розглянуті критерії міцності гірських порід мають свою область застосування при вирішенні задач міцності, стійкості і несучої здатності водонасичених ґрунтів і гірських порід. Встановлено, що отримані критерії міцності мають фізичний зміст в обмеженому діапазоні тисків в поровій рідині (або газі) і для обмеженого діапазону поєднань між нормальними головними напруженнями. Отримано залежності відносного руйнівного напруження від безрозмірного порового тиску за критеріями міцності Мора – Кулона, Бенявського, Хоека – Брауна.

Наукова новизна. Отримано модифікації критеріїв міцності Мора – Кулона, Бенявського, Хоека – Брауна, що дозволяють виконувати облік впливу на міцність і стійкість гірських порід надлишкового тиску в поровій рідині. Для кожної з модифікацій розглянутих критеріїв встановлені діапазони зниження міцності гірської породи при наявності надлишкового тиску в поровій рідині (газі).

Практичне значення. Отримані результати дозволяють виконувати прогноз міцності і стійкості складених обводненими породами гірських виробок і утримуючих конструкцій.

Ключові слова: критерій міцності, гірська порода, водонасичення, газ, надлишковий тиск, пластичність, зчеплення, внутрішнє тертя

Введение. В настоящее время в механике горных пород и механике грунтов используется множество различных критериев прочности, среди которых широкое распространение получили [1-5]: критерий Мора – Кулона; критерий Бенявского; критерий Хоека – Брауна; комбинированные критерии (например, учитывающие несколько механизмов разрушения, например растяжения и сдвига).

Каждый из этих критериев предназначен для описания поведения неводонасыщенного материала (исключение составляет одномерный критерий прочности Кулона – Мора, в котором в качестве прочностных характеристик приняты угол внутреннего трения φ и удельное сцепление c). При этом не до конца понятно, каким образом следует рассчитывать прочность и устойчивость водонасыщенных горных пород с использованием распространённых прочностных характеристик R_c и R_p – прочности на одноосное сжатие и растяжение соответственно. Этому вопросу и посвящена данная работа.

Также отметим, что авторами сознательно не разделяются термины «грунты» и «горные породы» ввиду того, что «С точки зрения строительства, грунтом называют всякую горную породу, используемую при строительстве в качестве основания сооружения, среды, в которой сооружение возводится, или материала для сооружения».

Цель работы. Установить, каким образом критерии прочности грунтов (Мора – Кулона, Бенявского, Хоека – Брауна) трансформируются при наличии в поровой жидкости избыточного давления и на основе анализа полученных решений классических задач механики грунтов выполнить оценку влияния порового давления на критическую высоту вертикального откоса, а также активное и пассивное давления на ограждающие конструкции. При этом преследовалась цель получить модификации критериев прочности, позволяющие выполнять учет влияния на прочность и устойчивость горных пород избыточного давления в поровой жидкости.

Материалы и методика исследований. Задача исследований была сформулирована так:

1. Известны прочностные характеристики грунта или горной породы (удельное сцепление c и угол внутреннего трения φ) или (прочность породы на одноосное сжатие R_c и одноосное растяжение R_p).
2. Известен удельный вес грунта (породы) γ .
3. Известно давление в поровой жидкости P .
4. Известен критерий прочности неводонасыщенной породы.
5. Требуется адаптировать известный критерий прочности на случай водонасыщенной горной породы.

Часть 1. Вначале рассмотрим одномерный критерий прочности Мора – Кулона [4]:

$$\tau \leq (\sigma - P) \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + c, \quad (1)$$

где σ – касательное напряжение; τ – то же, нормальное.

При этом учтем, что в механике грунтов и горных пород сжимающие нормальные напряжения следует учитывать со знаком «плюс», а растягивающие нормальные напряжения следует принимать со знаком «минус».

Кроме того, учтем, что согласно критерию прочности Мора – Кулона при прочих равных условиях разрушение грунта, горной породы и угля происходит при достижении максимальным и минимальным нормальными напряжениями

σ_1 и σ_3 некоторой критической комбинации. При этом главное нормальное напряжение σ_2 на прочность практически не влияет.

Для того, чтобы привести одномерное условие Мора – Кулона (1) к пространственному случаю с главными нормальными напряжениями σ_1 и σ_3 в соответствии с изложенной в работах В.А. Флорина и данными работ [4, 5] положим в (1):

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_m \cdot \cos(\varphi); \\ \sigma &= \sigma_m - \tau_m \cdot \sin(\varphi); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \tau_m &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}; \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \end{aligned} \right\}$$

Имеем:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} &\leq \sin(\varphi); \\ \sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) &\geq 0; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Анализ выражения (3) позволил сделать такие выводы:

1. Это выражение отличается от известного условия прочности Мора – Кулона [1, 4, 5] и представленных ниже соотношений (5) наличием в знаменателе слагаемого « P », т.е. порового давления, взятого со знаком «минус».

2. При возрастании порового давления и положительном значении знаменателя (3) происходит возрастание левой части верхнего уравнения. Таким образом, в данном случае имеет место уменьшение прочности грунта (горной породы).

3. При значительных значениях порового давления P и выполнении условия:

$$\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) < 0, \quad (4)$$

условие прочности (3) переходит в закритическую область и не имеет физического смысла.

4. Если в (3) поровое давление положить равным нулю, мы придем к общепринятой записи условия прочности Мора – Кулона:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} &\leq \sin(\varphi); \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Таким образом, общеизвестная запись условия прочности Мора - Кулона (5) является частным случаем полученного нами решения (3).

5. Если в (3) изменить знак перед поровым давлением P (т.е. не нагнетать в основание жидкость или газ, а откачивать их), то произойдет упрочнение основания.

Далее сопоставим условия прочности (3) и (5).

Разделим почленно верхнее равенство (5) на верхнее равенство (3). С

учетом того, что левая и правая части (3) и (5) больше нуля, имеем:

$$\psi = \frac{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} \leq 1. \quad (6)$$

Далее положим в (6)

$$\chi = \frac{2 \cdot P}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cdot c \cdot \operatorname{ctg}(\varphi)} \quad (7)$$

С учетом (7) неравенство второе условие (3) и неравенство (6) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \psi = 1 - \chi \leq 1; \\ 0 \leq \chi \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Таким образом, областью определения безразмерного комплекса χ являются все положительные числа на интервале $\chi \in (0, 1)$, а область значений функции ψ находится на интервале $\psi \in (0, 1)$, что позволяет сделать вывод о том, что при любом значении порового давления в водонасыщенной горной породе (или грунте) их прочность будет меньше, чем в неводонасыщенном состоянии.

Необходимо отметить, что равенство (3) также может быть получено более простым путем, исходя из следующих общих соображений:

Рассмотрим некоторый элементарный объем грунта (или горной породы), к которому снаружи приложены главные напряжения σ_1 , σ_2 и σ_3 .

Внутри образца действует давление в поровой жидкости или газе, численно равное P (в механике грунтов его называют нейтральным).

В соответствии с законом Паскаля это давление действует по всем направлениям, причем его значения по всем направлениям равны между собой.

Кроме того, в соответствии с принципом влагоемкости Терцаги, скелет грунта (горной породы) находится под воздействием эффективного давления, которое численно равно разности главных напряжений и порового давления P :

$$\left. \begin{aligned} & \left| \begin{array}{ccc} \sigma_{1,\text{эф}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{2,\text{эф}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{3,\text{эф}} \end{array} \right| = \\ & = \left| \begin{array}{ccc} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{array} \right| - \left| \begin{array}{ccc} P & 0 & 0 \\ 0 & P & 0 \\ 0 & 0 & P \end{array} \right| = \\ & = \left| \begin{array}{ccc} \sigma_1 - P & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 - P & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 - P \end{array} \right|; \\ & \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3; \\ & \sigma_{1,\text{эф}} \geq \sigma_{2,\text{эф}} \geq \sigma_{3,\text{эф}}; \\ & \sigma_1 - P \geq \sigma_2 - P \geq \sigma_3 - P. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $\sigma_{i,\text{эф}}$ – эффективные значения главных напряжений.

Для окончательного решения задачи заменим в (5) главные напряжения σ_i на их эффективные значения $\sigma_{i,эф}$. Таким образом мы придем к полученным ранее соотношениям (3).

Необходимо отметить, что одно и то же условие прочности (3) для водонасыщенного грунта (горной породы) было получено различными способами. Это свидетельствует о достоверности полученного результата.

Прочностные характеристики c (удельное сцепление) и φ (угол внутреннего трения) обычно используют при прогнозе разрушения грунтов [1, 4].

При этом в механике горных пород в качестве прочностных характеристик используют их прочность при одноосном сжатии R_c и растяжении R_p [5].

Согласно представленных в монографии Флорина: «Флорин В.А. Основы механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1959» и работе [5] данных, между прочностями на одноосное сжатие R_c и одноосное растяжение R_r , а также тригонометрическими функциями угла внутреннего трения горной породы и ее удельным сцеплением имеют место такие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} \sin(\varphi) &= \frac{R_c - R_r}{R_c + R_r}; \\ \cos(\varphi) &= \frac{2 \cdot \sqrt{R_c \cdot R_r}}{R_c + R_r}; \\ \operatorname{tg}(\varphi) &= \frac{\sin(\varphi)}{\cos(\varphi)} = \frac{R_c - R_r}{2 \cdot \sqrt{R_c \cdot R_r}}; \\ c &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{R_c \cdot R_r}; \end{aligned} \right\} \operatorname{ctg}(\varphi) = \frac{\cos(\varphi)}{\sin(\varphi)} = \frac{2 \cdot \sqrt{R_c \cdot R_r}}{R_c - R_r}. \quad (10)$$

Подставим соотношения (10) в полученное нами равенство (3), откуда, с учетом обозначения $\xi = R_r / R_c$ найдем:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{R_r}{R_c}; \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot R_c \cdot \frac{\xi}{1 - \xi}} &\leq \frac{1 - \xi}{1 + \xi}; \\ \sigma_1 + \sigma_3 - 2 \cdot P + 2 \cdot R_c \cdot \frac{\xi}{1 - \xi} &\geq 0; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Полученные условия (11) являются иной формой записи полученного ранее условия прочности Мора – Кулона для водонасыщенного грунта (3), где вместо прочностных материальных констант c и φ использованы иные материальные константы – R_c и R_r ,

Далее найдем область изменения параметра $\xi = R_r / R_c$.

Согласно современным представлениям о прочности горных пород, их угол внутреннего трения принимает значения $\varphi \in (0^\circ \dots 45^\circ)$, в силу чего тангенс угла внутреннего трения горной породы изменяется в диапазоне $\operatorname{tg}(\varphi) \in (0^\circ \dots 1^\circ)$.

Из (10) вытекает, что $tg(\varphi) = \frac{R_c - R_r}{2 \cdot \sqrt{R_c \cdot R_r}} = \frac{1 - \xi}{2 \cdot \sqrt{\xi}}$, в силу чего параметр $\xi = R_r / R_c$ имеет область изменения $\xi \in (1, \dots, 3 - 2 \cdot \sqrt{2})$.

Часть 2. Критерий прочности Бенявского для пространственного случая имеет вид [1, 3, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &\leq A \cdot (R_c)^{0,25} \cdot (\sigma_3)^{0,75} + R_c; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $A \in (0 \dots 20)$ – эмпирическая константа.

Для учета влияния на прочность породы давления в поровой жидкости P , используем неравенство (12) и соотношения (9). Имеем;

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &\leq A \cdot (R_c)^{0,25} \cdot (\sigma_3 - P)^{0,75} + R_c + P; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Анализ неравенства (13) позволил сделать такие выводы:

1. Если поровое давление превышает главное напряжение σ_3 (т.е. при $P > \sigma_3$), главное напряжение σ_1 является комплексным числом и не имеет физического смысла.

2. Если эмпирическая константа A равна нулю, то имеет место неравенство $\sigma_1 \leq R_c + P$, из которого вытекает что при возрастании порового давления P имеет место возрастание разрушающего напряжения σ_1 , то есть, чем выше давление, тем прочнее порода. Этот факт не соответствует современным представлениям о поведении водонасыщенных горных пород под нагрузкой.

Для дальнейшего анализа критерия прочности Бенявского приведем (12) и (13) к безразмерному виду:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &\leq A \cdot (\bar{\sigma}_3)^{0,75} + 1; \\ \bar{\sigma}_{1,\beta} &\leq A \cdot (\bar{\sigma}_3 - \bar{P})^{0,75} + 1 + \bar{P}; \\ \sigma_1^* &\leq \frac{A \cdot (\bar{\sigma}_3 - \bar{P})^{0,75} + 1 + \bar{P}}{A \cdot (\bar{\sigma}_3)^{0,75} + 1}; \\ \bar{\sigma}_1 &= \frac{\sigma_1}{R_c}; \quad \bar{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{R_c}; \quad \bar{P} = \frac{P}{R_c}; \\ \bar{\sigma}_1 &\geq \bar{\sigma}_2 \geq \bar{\sigma}_3. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $\bar{\sigma}_1$ – отнесенное к прочности породы на одноосное сжатие R_c главное напряжение σ_1 в неводонасыщенной горной породе; $\bar{\sigma}_{1,\beta}$ – то же, в водонасыщенной; $\bar{\sigma}_3$ – отнесенное к прочности породы на одноосное сжатие R_c главное напряжение σ_3 ; то же, главное напряжение σ_3 ; \bar{P} – то же, поровое давление; $\sigma_1^* = \frac{\bar{\sigma}_{1,\beta}}{\bar{\sigma}_1}$.

Первое верхнее неравенство (14) было получено путем нормировки критерия Бенявского для неводонасыщенной породы (неравенство (12)), а второе – путем нормировки критерия Бенявского для водонасыщенной породы (неравенство (13)).

Для ряда значений параметров A и $\bar{\sigma}_3$ были построены зависимости критического безразмерного напряжения σ_1^* от безразмерного давления в поровой жидкости \bar{P} (рис. 1-3) – здесь Ряд 1 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=0$; Ряд 2 – $\bar{P}=0$ и $A=1-10$; Ряд 3 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=1$; Ряд 4 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=5$; Ряд 5 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=10$; Ряд 6 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=15$; Ряд 7 – $\bar{P} \neq 0$ и $A=20$.

Представленные на рисунках 1-3 кривые позволили сделать такие выводы:

1. Чем больше давление в поровой жидкости, тем меньше напряжение σ_1 следует приложить для разрушения горной породы.

2. Чем меньше отношение главных напряжений σ_3 / σ_1 , тем для меньшего диапазона давлений в поровой жидкости приемлема формула Бенявского.

3. Чем больше эмпирическая константа A , тем больше тангенс угла наклона кривой «относительное главное напряжение $\bar{\sigma}_1$ – безразмерное поровое давление \bar{P} ».

4. При равном нулю значении эмпирического коэффициента A при возрастании порового давления возрастает прочность породы. Этот факт противоречит экспериментальным данным и современным представлениям поведению горных пород под нагрузкой.

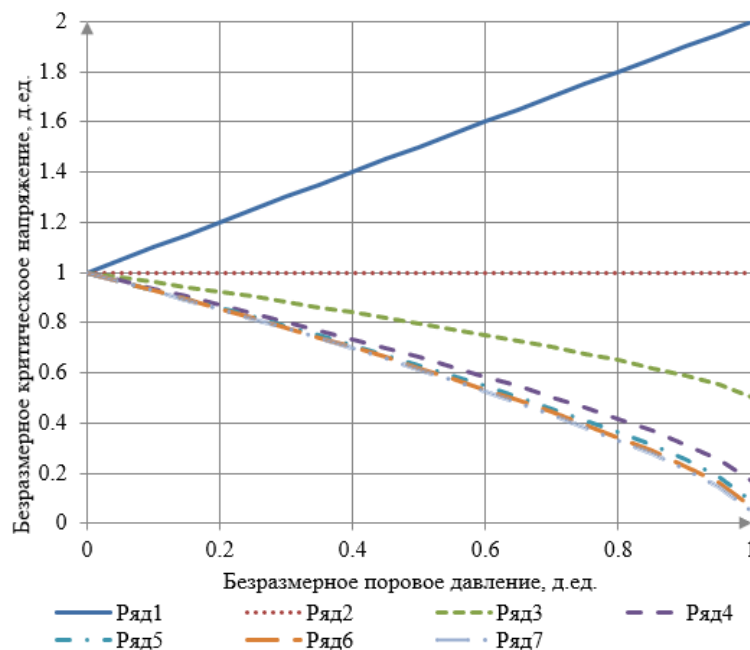


Рис. 1. Зависимость относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления (по критерию прочности Бенявского)

Примечание к рис. 1: 1. По оси абсцисс отложено относительное давление, рассчитанное по формуле $\bar{P} = P/R_c$. 2. По оси ординат отложено относительное давление, рассчитанное по формуле $\sigma_1^* = \sigma_{1,в} / \sigma_1$. 3. Соотношения между главными напряжениями: $\sigma_3 = \sigma_1$.

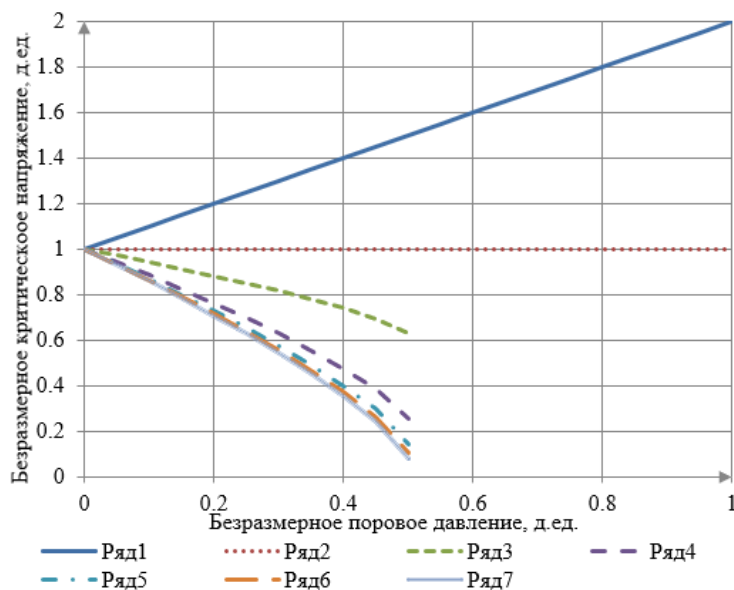


Рис. 2. Зависимость относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления (по критерию прочности Бенявского)

Примечание к рис. 2: 1. Оси абсцисс и ординат аналогично рис. 1. 2. Соотношения между главными напряжениями: $\sigma_3 = \sigma_1 / 2$.

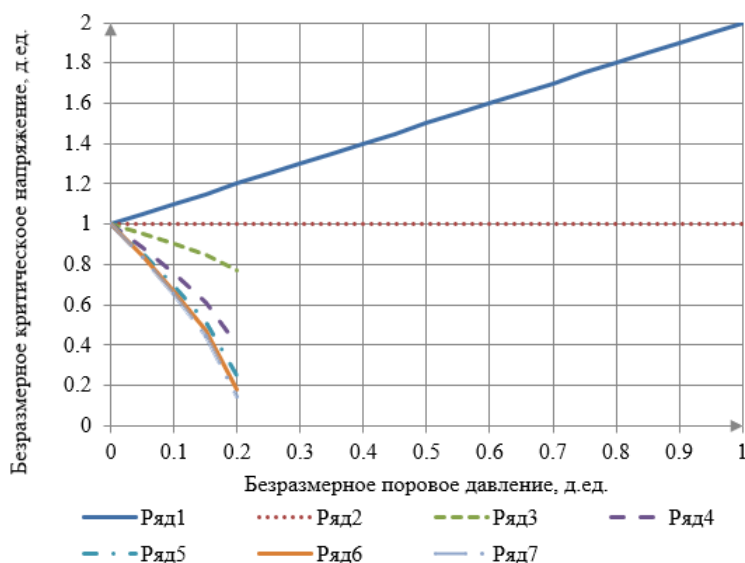


Рис. 3. Зависимость относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления (по критерию прочности Бенявского)

Примечание к рис. 3: 1. Оси абсцисс и ординат аналогично рис. 1. 2. Соотношения между главными напряжениями $\sigma_3 = \sigma_1 / 5$.

В целом, был сделан вывод о том, что полученная нами модификация критерия прочности Бенявского применима для прогноза прочности водонасыщенных горных пород в ограниченном диапазоне давлений в поровой жидкости и в ограниченном диапазоне изменения эмпирического коэффициента A .

Часть 3. Критерий прочности Хоека – Брауна для грунта и породы с ненарушенной структуры в пространственном случае имеет вид [1, 3, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &\leq \sigma_3 + R_c \cdot \sqrt{m \cdot \frac{\sigma_3}{R_c} + 1}; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где $m \in (0 \dots 33)$ – эмпирическая константа.

Также следует учесть, что в соотношениях (15) растягивающие напряжения следует принимать со знаком «минус», а сжимающие со знаком «плюс».

Для учета влияния на прочность породы давления в поровой жидкости P , используем неравенство (15) и соотношения (9). Имеем;

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &\leq \sigma_3 + R_c \cdot \sqrt{m \cdot \frac{\sigma_3 - P}{R_c} + 1}; \\ \sigma_1 &\geq \sigma_2 \geq \sigma_3. \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

Анализ неравенства (16) позволил сделать такие выводы:

1. При равном нулю значении эмпирического коэффициента m прочность породы не зависит от давления в поровой жидкости. Такое поведение под нагрузкой характерно для идеально – пластических сред.

2. При выполнении неравенства:

$$P > \sigma_3 + \frac{R_c}{m}, \quad (17)$$

главное напряжение σ_1 становится комплексным числом, в силу чего неравенство (16) теряет физический смысл.

Для дальнейшего анализа критерия прочности Хоека – Брауна приведем (15) и (16) к безразмерному виду. Имеем:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &\leq \bar{\sigma}_3 + \sqrt{m \cdot \bar{\sigma}_3 + 1}; \\ \bar{\sigma}_{1,\epsilon} &\leq \bar{\sigma}_3 + \sqrt{m \cdot (\bar{\sigma}_3 - \bar{P}) + 1}; \\ \sigma_1^* &= \frac{\bar{\sigma}_{1,\epsilon}}{\bar{\sigma}_1} \leq \frac{\bar{\sigma}_3 + \sqrt{m \cdot (\bar{\sigma}_3 - \bar{P}) + 1}}{\bar{\sigma}_3 + \sqrt{m \cdot \bar{\sigma}_3 + 1}}; \\ \bar{\sigma}_1 &= \frac{\sigma_1}{R_c}; \quad \bar{\sigma}_3 = \frac{\sigma_3}{R_c}; \quad \bar{P} = \frac{P}{R_c}; \\ \bar{\sigma}_1 &\geq \bar{\sigma}_2 \geq \bar{\sigma}_3. \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где $\bar{\sigma}_1$ – отнесенное к прочности породы на одноосное сжатие R_c главное напряжение σ_1 в неводонасыщенной горной породе; $\bar{\sigma}_{1,\epsilon}$ – то же, в водонасыщенной; $\bar{\sigma}_3$ – отнесенное к прочности породы на одноосное сжатие R_c главное напряжение σ_3 ; то же, главное напряжение σ_3 ; \bar{P} – то же, поровое давление; $\sigma_1^* = \frac{\bar{\sigma}_{1,\epsilon}}{\bar{\sigma}_1}$.

Первое верхнее неравенство (18) было получено путем нормировки критерия Хоека – Брауна для неводонасыщенной породы (неравенство (15)), а второе – путем нормировки критерия Хоека – Брауна для водонасыщенной породы (неравенство (16)).

Для ряда значений параметров m и $\bar{\sigma}_3$ нами построены зависимости критического безразмерного напряжения σ_I^* от безразмерного давления в поровой жидкости \bar{P} (рис. 4-6) – здесь Ряд 1 – эмпирический коэффициент $m=0$; Ряд 2 – то же, $m=1$; Ряд 3 – то же, $m=5$; Ряд 4 – то же, $m=10$; Ряд 5 – то же, $m=15$; Ряд 6 – то же, $m=20$; Ряд 7 – то же, $m=33$.

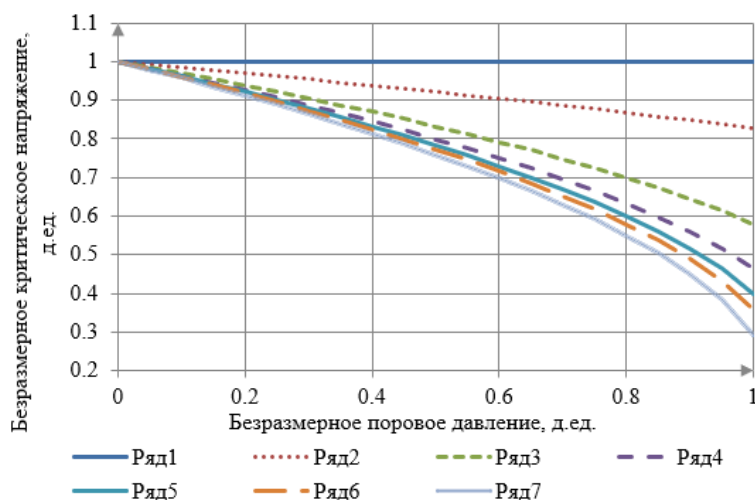


Рис. 4. Зависимость относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления (по критерию прочности Хоека – Брауна)

Примечание к рис. 4: Расчет осей и соотношений аналогично рис. 1.

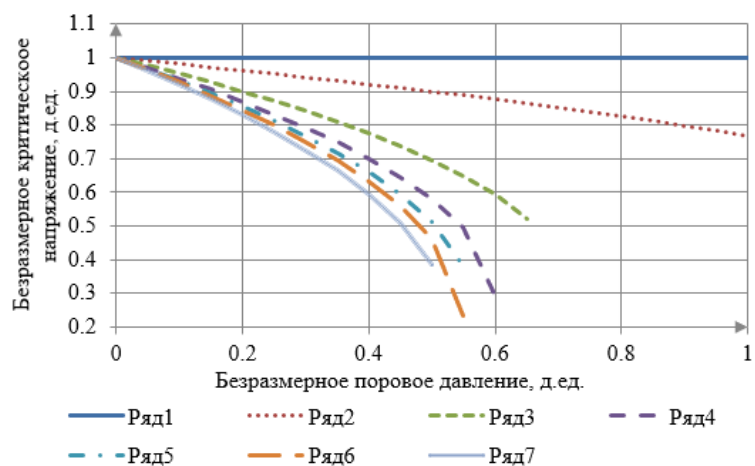


Рис. 5. Зависимость относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления (по критерию прочности Хоека – Брауна)

Примечание к рис. 5: Расчет осей и соотношений аналогично рис. 2.

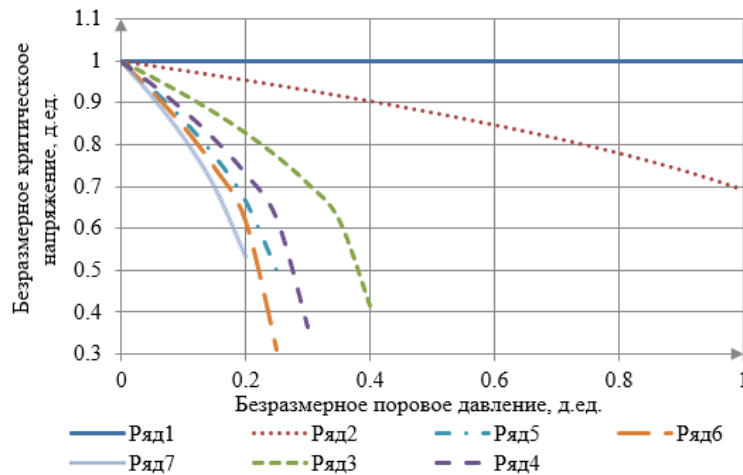


Рис. 6. Залежність відносного руйнівного напруження від безрозмірного порового тиску (за критерієм міцності Хюека – Брауна)

Примечание к рис. 6: Расчет осей и соотношений аналогично рис. 3.

Представленные на рисунках 4-6 кривые позволили нам сделать такие выводы:

1. Чем больше давление в поровой жидкости, тем меньше напряжение σ_1 следует приложить для разрушения горной породы.
2. Чем меньше отношение главных напряжений σ_3 / σ_1 и больше значение эмпирического коэффициента m , тем для меньшего диапазона давлений в поровой жидкости приемлема формула Хюека – Брауна.
3. Чем больше эмпирическая константа m , тем больше абсолютная величина тангенса угла наклона кривой «относительное главное напряжение $\bar{\sigma}_1$ – безразмерное поровое давление \bar{P} ».

В целом, был сделан вывод о том, что полученная модификация критерия прочности Хюека – Брауна применима для прогноза прочности водонасыщенных горных пород в ограниченном диапазоне давлений в поровой жидкости и в ограниченном диапазоне изменения эмпирического коэффициента m .

Выводы. 1. С использованием критериев прочности горных пород Кулона – Мора, Бенявского, Хюека – Брауна получены новые критерии прочности для водонасыщенных горных пород, в поровой жидкости которых имеет место избыточное давление.

2. Эти результаты допускают естественное обобщение на горные породы, находящиеся под воздействием давления в поровом газе и водно-газовой смеси.

3. Показано, что полученные критерии прочности имеют физический смысл в ограниченном диапазоне давлений в поровой жидкости (или газе) и для ограниченного диапазона сочетаний между нормальными главными напряжениями.

4. В ходе численного эксперимента было установлено, что избыточное давление в поровой жидкости (газе) приводит к снижению прочности горной

породы: согласно модификации пространственного критерия прочности Кулона Мора на 0-100%; согласно модификации пространственного критерия прочности Беневского на 0-90%; согласно модификации пространственного критерия прочности Хоека – Брауна на 0-70%;

5. Область применения полученных результатов – прогноз прочности, устойчивости и несущей способности водонасыщенных грунтов и горных пород, в том числе решение таких проблем как: устойчивость откосов и склонов; устойчивость горных выработок; определение активного давления на ограждающие конструкции.

Перечень ссылок

1. Шашенко, О.М., Сдвижкова, О.О., Гапеев, С.М. (2008). *Деформованість та міцність масивів гірських порід: Монографія*. Дніпропетровськ: НГУ, 224 с.
2. Зарецкий, Ю.К. (1989). *Лекции по современной механике грунтов*. Ростов. 608 с.
3. Литвинский, Г.Г. (2008). *Аналитическая теория прочности горных пород и массивов. Монография*. Донецк: Норд-Пресс. 207 с.
4. Ухов, С.Б. (2007). *Механика грунтов, основания и фундаменты: Учебник*. М: АСВ. 566 с.
5. Шаповал, В.Г., Седин, В.Л., Шаповал, А.В., Моркляник, Б.В., Андреев, В.С. (2010). *Механика грунтов. Учебник*. Днепропетровск: Пороги. 168 с.
6. Шашенко, А.Н., Тулуб, С.Б., Сдвижкова Е.А. (2002). *Некоторые задачи статистической геомеханики*. К.: Пульсари. 304 с.
7. Богомоллов, А.Н., Пономарев, А.Б., Богомоллова, О.А. (2015). Определение давления грунта на противооползневые удерживающие сооружения на основе анализа напряженного состояния приоткосной области. *Вестник ПНИПУ №3*. Пермь. с. 5-21.
8. Шихиев, Ф.М., Яковлев, П.И. (1975). Активное давление разнослойной засыпки на подпорную стенку. *Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2*. с. 24-26.
9. Яковлев, П.И. (1974). Экспериментальные исследования давления грунта на стенки с двумя разгружающими плитами при разрывных нагрузках на засыпке. *Основания, фундаменты и механика грунтов, № 3*. с. 7-9.
10. Корн, Г., Корн Т. (1974). *Справочник по математике*. М.: Наука. 840 с.

АННОТАЦИЯ

Цель. Установить, каким образом критерии прочности и устойчивости горных пород трансформируются при наличии в поровой жидкости избыточного давления и на основе анализа полученных решений классических задач механики грунтов выполнить оценку влияния порового давления на критическую высоту вертикального откоса.

Методы. Теоретические исследования геомеханических процессов с использованием аналитических математических методов. Анализ и обобщение результатов теоретических исследований.

Результаты исследований. Получены модификации известных критериев прочности Мора – Кулона, Бенявского, Хоека – Брауна, позволяющие при определении прочности горных пород выполнять учет наличия в поровой жидкости избыточного давления. Выполнено сопоставление критической высоты вертикального откоса, а также активного и пассивного давления водонасыщенных и неводонасыщенных горных пород. Полученные результаты допускают естественное обобщение на горные породы, в которых под избыточным давлением находится поровый газ. Сделан вывод о том, что все рассматриваемые критерии прочности горных пород имеют свою область применения при решении задач прочности,

устойчивости и несущей способности водонасыщенных грунтов и горных пород. Получены зависимости относительного разрушающего напряжения от безразмерного порового давления по критериям прочности Мора – Кулона, Бенявского, Хоека – Брауна.

Научная новизна. Получены модификации критериев прочности Мора – Кулона, Бенявского, Хоека – Брауна, позволяющие выполнять учет влияния на прочность и устойчивость горных пород избыточного давления в поровой жидкости. Для каждой из модификаций рассматриваемых критериев установлены диапазоны снижения прочности горной породы при наличии избыточного давления в поровой жидкости (газе). Установлено, что полученные критерии прочности имеют физический смысл в ограниченном диапазоне давлений в поровой жидкости (или газе) и для ограниченного диапазона сочетаний между нормальными главными напряжениями.

Практическое значение. Полученные результаты позволяют выполнять прогноз прочности и устойчивости сложенных обводненными породами горных выработок и удерживающих конструкций.

Ключевые слова: критерий прочности, горная порода, водонасыщение, газ, избыточное давление, пластичность, сцепление, внутреннее трение.

ABSTRACT

The research **aims** to determine the way criteria of rock strength and stability are modified in presence of excessive pressure in pore liquids and to assess the impact of pore pressure on the critical height of the vertical slope by analyzing solutions of classical problems in soil mechanics.

The research methods include theoretical studies of geomechanical processes by means of analytical mathematical methods.

The obtained results include modifications of the known Mohr-Coulomb, Bieniawski, Hoek-Brown failure criteria determining rock strength with due regard to excessive pore fluid pressure. The critical height of the vertical slope and active and passive stresses of saturated and unsaturated rocks are compared. The given results enable natural generalization for rocks in which there is some pore gas under excessive pressure. It was concluded that all the criteria for the strength of mountain lands under consideration have their own field of application when solving problems of strength, stability and carrying capacity of water-saturated soils and rocks. Mohr - Coulomb, Bieniawski, Hoek - Brown. The dependences of the relative destructive stress on the dimensionless pore pressure are obtained according to the strength criteria of Mohr – Coulomb, Bieniawski, Hoek – Brown.

The scientific novelty of the research includes modifications of the Mohr-Coulomb, Bieniawskii, Hoek-Brown failure criteria enabling consideration of impacts of excessive pore fluid pressure on rock strength and stability. For each of the modifications of the criteria under consideration, ranges of reduction of rock strength in the presence of excess pressure in the pore fluid (gas) are established. It has been established that the obtained strength criteria have a physical meaning in a limited pressure range in the pore fluid (or gas) and for a limited range of combinations between normal principal stresses.

Practical significance of the research involves predicting the failure of rock in mine workings composed of water-bearing strata and support structures.

Keywords: failure criterion, rock, saturation, gas, elasticity, cohesion, internal friction