

УДК 539.4.015

О НАДЕЖНОСТИ ОЦЕНКИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СОЛЕЙ

Осипов С.Н., Смычник Е.А., Шваб Р.Г. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

Приведен анализ стохастических процессов разрушения пород и надежности оценки их прочностных свойств. Большие колебания прочностных свойств пород по шахтному полю требуют совершенствования методики оценки водозащитных параметров междуупластья.

Показано влияние времени действия нагрузки и пластических свойств породы на процесс деформации и разрушения, что особенно характерно для глин.

Введение

Как показывает вековой опыт эксплуатации более сотни соляных рудников, из которых большинство отработано в Германии, в случае наличия в кровле водоносного горизонта около 20-25 % рудников оказались затоплены, что определяет надежность инженерной оценки параметров водозащитной толщи в размере 75-80 %. С учетом высокой стоимости калийного рудника (более 10^9 долларов США) проблема повышения надежности оценки водозащитной толщи (ВЗТ) должна быть признана первоочередной.

В этой проблеме важное значение имеют пластические свойства пород и стохастические особенности их разрушения. Изучение этих свойств пород позволит повысить надежность инженерной оценки параметров водозащитной толщи.

Некоторые стохастические особенности породного массива и пластичности пород

Особый интерес представляет монография В.Т. Глушко и С.П. Гавеля [1], в которой приведены результаты исследований статистических характеристик значений прочности горных пород. Изменчивость прочностных свойств горных пород обусловлена, с одной стороны, естественным разбросом, особенно при композитной структуре осадочных пород, а с другой – за счет погрешностей испытаний и методик опробования. При этом средние значения являются не наиболее вероятными значениями прочности, а средними плотностей распределения вероятностей. Определено [1], что увеличение степени разброса в 2 раза приводит к уменьшению минимальных значений прочности породы и соответственно к уменьшению ее надежности в 2-5 раз.

Некоторые авторы [2] утверждают, что величина допустимой относительной погрешности для исследовательских работ составляет 8-12 %, а для производственных целей – 20-30 %. Надежность выводов и решений для производственных целей необходимо обеспечить [1] в размере $N = 0,80$; для производственно-исследовательских работ – $N = 0,90$; для лабораторных исследований – $N \geq 0,95$. При этом для нормального распределения значений величины использования необходимых коэффициентов надежности составляют: 1,28 при $N = 0,80$; 1,64 при $N = 0,90$ и 1,96 при $N = 0,95$.

Здесь необходимо отметить, что согласно утверждению П.В. Новицкого и И.А. Зорграфа [3] в работе П.В. Новицкого [4] было показано, что среди различных произвольно назначаемых значений доверительной вероятности есть одно значение, обладающее уникальным свойством. Оказывается, что интегральные кривые для широ-

кого класса симметричных, высокоэнтропийных распределений (равномерного, треугольного, трапецеидального, нормального, экспоненциального с показателем степени $\alpha \geq 2/3$ и даже двухмодальных с небольшой глубиной антимодальности) в области 0,05-й и 0,95-й квантилей пересекаются между собой в очень узком интервале значений $x/\sigma = 1,6 \pm 0,05$. Поэтому с погрешностью в $0,05\sigma$ можно считать, что 0,05-й и 0,95-й квантили для любых из этих распределений могут быть определены как $X_{0,05} = \bar{X} - 1,6\sigma$ и $X_{0,95} = \bar{X} + 1,6\sigma$, где \bar{X} – координата центра распределения. При односторонней надежности $F(x) > 0,95$, т.е. при $P_d > 0,9$ интегральные кривые для разных законов распределения резко расходятся между собой.

Необходимо отметить, что огромные материальные убытки (более 10^9 долларов США) в случае затопления только одного современного калийного рудника и повышенная вероятность последовательного затопления других рудников данного месторождения заставляют перейти от современного примерно 80 % уровня надежности проектных и производственных решений по защите горных выработок от затоплений хотя бы к 95 % уровню надежности, то есть снизить вероятность затопления в 4 раза с 20 до 5 %.

Проблемы водозащиты горных выработок соляных рудников наряду с общими по сравнению с разработкой нерастворимых полезных ископаемых обладают двумя существенными отличиями. Первой является растворимость соли в воде или ненасыщенном рассоле, в результате чего без преобладающего воздействия процессов «залечивания» каналов поступления H_2O водопрводящие каналы будут расширяться, и проникновение H_2O увеличится. Второе отличие заключается в высокой пластичности во времени солей и некоторых соленосных пород, что существенно влияет на процессы трещинообразования.

Коэффициенты вариации значений прочности на сжатие $K_{вск}$ для исследованных песчаников, алевролитов и аргиллитов по пробе составляют соответственно 6-18, 10-23 и 10-23 %, а на растяжение соответственно 6-20, 11-30 и 13-32 % [1]. По участку или шахтному полю значение коэффициента вариации K_v прочности пород угольных месторождений при сжатии может увеличиться до 60 %, а при растяжении – до 80 % [1].

Такие высокие значения K_v в значительной мере обесценивают практические результаты расчетов, основанные на определении прочностных свойств пород вдали от расчетного места даже в пределах шахтного поля.

Для обеспечения необходимой надежности результатов расчетов большое значение имеет статистическое распределение значений прочности. Как показывает статистический анализ 129 эмпирических распределений различных прочностных характеристик [1], им присущи следующие характерные особенности: кривые распределения в большинстве случаев имеют одну вершину, часто несимметричны относительно своего среднего значения и имеют разброс от 10 до 60 % и даже больше; распределения имеют левую крайнюю точку, представляющую минимальное значение для данного материала; коэффициент эксцесса в 75 % случаев существенно отличается от нормального распределения; иногда встречаются гистограммы с несколькими максимумами, что свидетельствует о неоднородности выборки, или другими погрешностями. Так установлено [5], что технические измерения являются «засоренными» аномальными наблюдениями до 10 %, а производственные – до 20 %.

К сожалению, аналогичные исследования статистических характеристик значений прочности горных пород соляных месторождений пока не проведены, хотя вопросу основных физико-механических свойств пород и руд Старобинского месторождения калийных солей посвящено несколько опубликованных работ [6, 7].

Интересно отметить, что большинство плотностей распределения значений содержания СН_4 в исходящих струях очистных забоев, участков и шахт Донбасса вполне удовлетворительно соответствует нормальному закону [8].

Некоторое представление о возможных колебаниях значений максимальных горизонтальных деформаций в границах мульд сдвижений пород при подработке можно получить при сравнении формул академика С.П. Авершина приведенных в [9] и рекомендованных для обычных случаев:

$$\varepsilon_{\max} = 3K_{\text{н}}\eta_{\max} / z^2 \quad (1)$$

и для особо ответственных задач:

$$\varepsilon_{\max} = 6,3K_{\text{н}}\eta_{\max} / z^2, \quad (2)$$

где ε_{\max} – максимальные горизонтальные деформации;

$K_{\text{н}} = (0,15 - 0,18)H$ – коэффициент, м;

η_{\max} – максимальное оседание, м;

z – длина полумульды, определяемая по граничному углу, м;

H – расстояние от разрабатываемого пласта до расчетного горизонта, м.

Как видно из приведенных формул, они отличаются в 2,1 раза. Если в формуле (1) надежность расчета принималась порядка $0,8 \div 0,85$ (при плотности распределения близкой к нормальному), то особо ответственная задача должна соответствовать дополнительному количеству стандартных отклонений. В этом случае при среднем значении $\bar{\varepsilon}_{\max} = 2,5K_{\text{в}}\eta_{\max} / z^2$ и $K_{\text{в}} = (6,3 - \bar{\varepsilon}_{\max}) / 3$ $\bar{\varepsilon}_{\max} \approx 0,51$, что на фоне приведенных значений $K_{\text{в}}$ для разброса прочностных характеристик горных пород выглядит вполне правдоподобным. Так, по данным [6] коэффициенты вариации значений пределов прочности на одноосное сжатие мергеля и доломита из покровной толщи Старобинского месторождения калийных солей составили соответственно 44 и 45 %.

При опускании слоистых породных массивов неравномерность распределения нагрузок возникает постоянно не только вследствие действия опорного давления, но также в результате стохастической изменчивости физических свойств горных пород и геометрии их примыкания по плоскостям наслоения. Последнее может приводить к неравномерности зажатия отдельных участков пород, что, в свою очередь, может способствовать образованию крупных зияющих водопроводящих трещин, которые не могут закрываться даже в глинистых породах за счет их набухания при контакте с водой.

Сравнивая методики определения свойств материала, предлагаемые С.Н. Леоновичем [10] и Б.Г. Холодарь [11], необходимо отметить и разную идеологическую основу. Если методика С.Н. Леоновича использует детерминированный подход, то Б.Г. Холодарь в значительной мере использует стохастический подход. Повидимому, наиболее важные теоретические и практические результаты можно ожидать от рационального совместного использования детерминированной и стохастической моделей.

Обычно при компьютерном моделировании и расчете напряженно-деформированного состояния подработанного массива горных пород выделяют несколько областей (слоев), находящихся в различно деформированном состоянии [12].

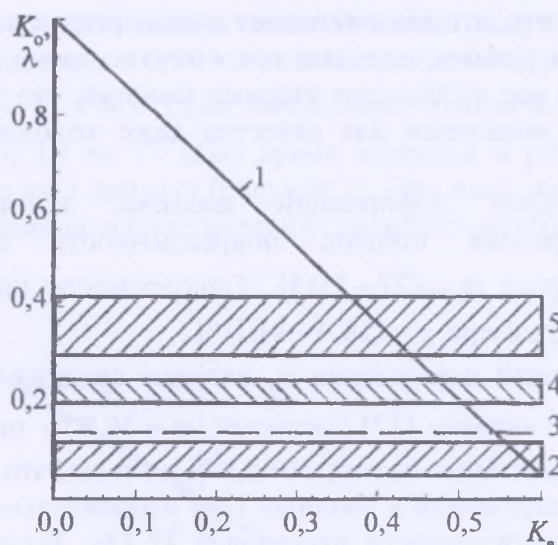
Для обеспечения 95 % надежности при определении расчетных минимальных (ослабленных) значений прочности можно использовать коэффициент $K_0 = 1 - tK_{\text{в}}$,

где t – показатель надежности, равный $t=1,6$ [3]. В таком случае при $K_b=0,43$ $K_o=0,31$, а при $K_b=0,3$ $K_o=0,52$, т.е. расчетную прочность пород на одноосное сжатие следует принимать в 2-3 раза меньше средней величины.

Особый интерес для эффективной водозащиты представляет структура и прочность подработанного массива. Изучение структуры подработанного массива по заложенным в скважины реперам и перископам наблюдения в горных выработках, пройденных в подработанном массиве, исследования на моделях дают весьма приближенную информацию о структуре массива и тем более его прочности. Наиболее информативными представляются натурные исследования, проведенные на Коркинском бурогольном месторождении, где длинными столбами по простиранию с полным обрушением кровли подработаны северный и восточный борта карьера, а южный и западный остались в первоначальном природном состоянии [13]. Как показали эти исследования, слоистость пород выражена весьма четко, а интенсивность трещин больше в аргиллитах и алевролитах (глиносодержащие породы), чем в песчаниках; размеры структурных блоков в аргиллитах и алевролитах колеблются от 0,15x0,20 (30 %) до 0,5x1,0 м (70 %), в песчаниках – от 0,3x0,4 (20 %) до 1,0x2,0 м (20 %) при среднем размере 0,5x1,0 м (60 %). В зоне трещинообразования подработанный массив визуально мало отличается от неподработанного. Слоистость пород сохраняется полностью, но наблюдается более интенсивная трещиноватость. Здесь в алевролите раскрытие трещин составляет от волосьяных (15 %) до 2 см (25 %) при среднем размере 0,7 см.

Коэффициент структурного ослабления $\lambda = K_m / K_k$ (K_m – величина сцепления в массиве и K_k – то же в образцах) массива по сравнению с образцами существенно зависит от подработки. Так, для аргиллитов и алевролитов коэффициент структурного ослабления составил $\lambda = 0,30-0,42$ [13], т.е. прочность в массиве всего в 2-3 раза меньше прочности в куске. В зоне трещин $\lambda = 0,056-0,121$ для аргиллитов и $\lambda = 0,068-0,148$ для алевролитов при среднем значении $\lambda = 0,12$, что в 2,5-3,5 раза меньше неподработанного массива. В зоне плавного прогиба коэффициент структурного ослабления составляет $\lambda = 0,20-0,25$, что уже в 1,5-2,0 раза меньше неподработанного массива. Для сравнения величин уменьшения расчетной прочности пород на сжатие с учетом K_b и коэффициентов структурного ослабления на рисунке 1 приведены зависимость $K_o = f(K_b)$ при $t=1,6$ (прямая 1) и зоны значений λ для области трещиноватости подработанной толщи аргиллитов (2) и алевролитов (3), области прогиба этих же пород (4), а также неподработанных этих же пород (5).

Как видно из приведенных данных (рисунок 1), расчетное уменьшение величин прочностей пород на одноосное сжатие при $K_b > 0,35$ соответствует коэффициентам структурного ослабления неподработанного породного массива, а при $K_b > 0,45$ – подработанного породного массива. Поэтому оценка надежности расчета устойчивости ВЗТ требует проведения специальных исследований.



- 1 – зависимость $K_0 = f(K_в)$; 2 – зона коэффициентов структурного ослабления подработанных пород в области трещинообразования для аргиллитов;
 3 – то же для алевролитов;
 4 – то же в области плавного прогиба для аргиллитов и алевролитов;
 5 – то же для неподработанных пород

Рисунок 1 – Зависимость расчетного ослабления прочности пород от $K_в$ и условий подработки

Использованная Б.Г. Холодарь аналитическая модель разрушения [11] не предусматривает возможности релаксации различных повреждений внутренней структуры материала под действием определенного вида и уровня нагрузок. Однако в этом отношении показательны результаты исследований, приведенные в табличном виде в монографии С.С. Вялова [14] для каолина. Вопросы релаксации повреждений структуры бетона рассмотрены также С.Н. Леоновичем [10].

Особый интерес для обеспечения горных выработок от затопления представляют отложения глин и глинистых пород (сланцев и др.) в подработанной толще пород. Поэтому анализ различных (прочностных, пластических, физико-химических и др.) свойств глин и глиносодержащих пород представляет большой практический интерес.

При исследовании весьма пластичного каолина с влажностью $W = 40\%$ для оценки изменения структуры в процессе деформирования установлено [14], что в исходном состоянии при отсутствии нагрузки (напряжение $\sigma = 0$) степень поврежденности материала составляла $\omega_0 = 24,1\%$. Создание напряжения $\sigma = (7,5 - 9,1)$ кПа привело к уменьшению поврежденности структуры до средней величины $\omega = 21,4$ при значении для отдельных образцов $\omega_c = (20,3 - 23,1)\%$. При этом наблюдалась затухающая ползучесть при отсутствии преобладающей ориентации частиц, уменьшилось количество дефектов структуры по сравнению с исходным состоянием. Микротрещины стремятся сомкнуться, а полости и пустоты – сжаться и вытянуться в направлении сдвига. Происходит уплотнение с образованием новых межчастичных связей взамен нарушенных. При этом дефекты структуры в основном уменьшаются в начальный период деформирования, соответствующий наиболее интенсивному росту деформаций. В одном из опытов степень поврежденности при ее начальном значении $\omega_0 = 25\%$ уменьшилась до 22% через 2 суток после начала испытания при затухающей ползучести и до 20% после 6 суток.

Необходимо отметить, что «залечивание» микротрещин и улучшение структуры материала, например, для ручных стальных кос известно давно. Для этого лезвия старых много поработавших кос «отбивали» ударами молотка, что улучшало их качество. Полезность применения «наклепа» для качества даже холодного металла известна очень давно.

При установившейся деформации каолина, которая возникает при $\sigma = (10,0 - 13,3)$ кПа, средняя степень поврежденности структуры достигает $\varpi = 34,4\%$ с зоной разброса $\omega_i = (27 - 35)\%$. Одновременно появляется преобладающая ориентация частиц в размере $g = (18,4 - 41,1)\%$.

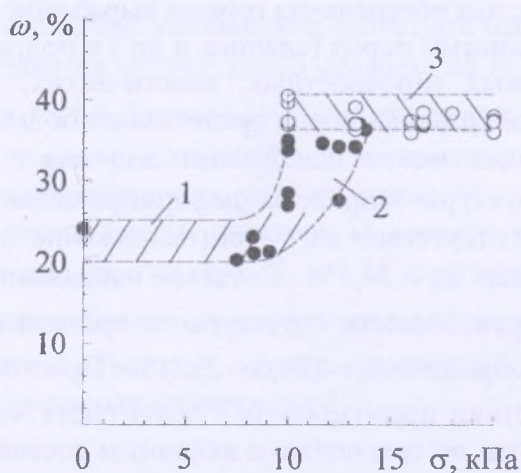
При прогрессирующей деформации τ_p каолина средняя степень поврежденности по данным [14] и их анализе [17] достигает $\varpi = 36,9\%$ при $\omega_i = (36,3 - 37,2)\%$ (рисунок 2), а степень ориентации частиц от $65,8\%$ до нуля, что зависит от продолжительности воздействия напряжений в каолине. При относительно медленном разрушении каолина степень поврежденности превышает $37,2\%$. Если разрушение каолина происходит быстро, переориентация частиц зачастую не успевает произойти и структура практически не меняется. Однако микро- и макротрещины образуются даже в этом случае и, например, при разрушении за $0,03$ часа степень поврежденности увеличилась с $24,1$ до 36% .

При прогрессирующей деформации время выхода на лавинообразное разрушение образцов каолина τ_p сильно зависит от величины напряжения (рисунок 3).

Использование 6-ти значений из $\lg \tau_p = f(\sigma)$, приведенных в [14], дает линейную зависимость вида:

$$\lg \tau_p = a_3 - v\sigma, \quad (3)$$

где a_3 и v – эмпирические коэффициенты, $a_3 = 9,34$ и $v = 6,5$ при σ в кПа и τ_p в час.



1 – зона затухающей деформации; 2 – зона установившегося и прогрессирующего течения;
3 – зона итогового разрушения;

сплошные точки (●) – отсутствие разрушения; полые точки (○) – разрушение

Рисунок 2 – Влияние напряжения каолиновой массы на степень поврежденности структуры

Эта эмпирическая зависимость имеет весьма тесную корреляционную связь (корреляционное отношение $r = 0,99$) и небольшую величину относительного коэффициента вариации ($K_{в.о} = 12,5\%$). Здесь необходимо отметить, что при увеличении напряжения в 1,7 раза (с 10 до 17 кПа) время перехода к разрушающей деформации уменьшается примерно на 3 порядка (рисунок 3). При этом, конечно, нужно учитывать также физические особенности пластических глинистых материалов.

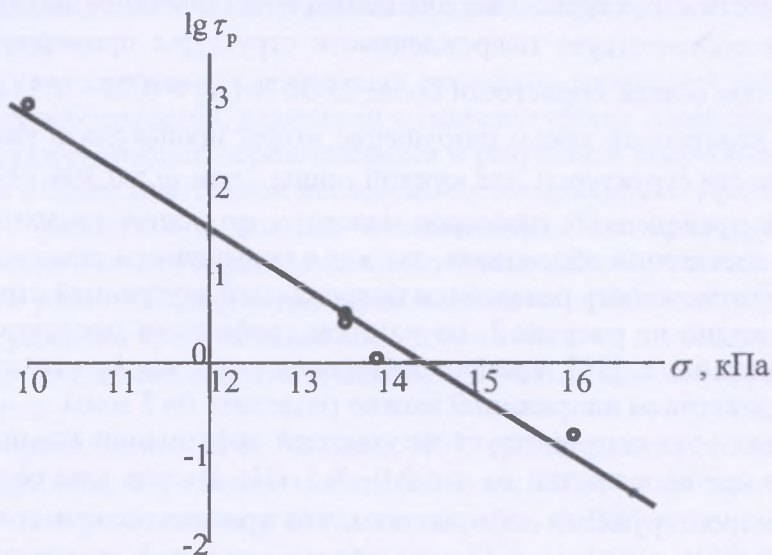


Рисунок 3 – Зависимость логарифма продолжительности перехода образцов каолиновой массы к разрушению от действия напряжений. Точки – результаты экспериментов

Значения степени поврежденности структуры каолина в момент разрушения составляли $\omega_p = (35,9 - 40,5)\%$ при среднем значении $\varpi = 37,5\%$, т.е. всего на 0,6% больше по сравнению со средним значением при прогрессирующей деформации, которая практически является началом процесса разрушения. Для юрской глины [14] с влажностью $W = 32\%$ степень поврежденности структуры в момент разрушения составляла $\omega_i = (39,6 - 43,0)\%$ при среднем значении $\varpi = 40,9\%$.

Для оценки уровней разброса значений величин повреждений ω_i при разрушении каолиновой массы под действием разных напряжений (10-16 кПа и 16,6-20 кПа) произведено определение среднеквадратических отклонений λ и коэффициентов вариации K_v . Как показывают расчеты, при $\sigma = 13$ кПа $\lambda = 1,39\%$ и $K_v = 4\%$ при 12 экспериментах и $\varpi = 37,5\%$. При $\sigma = 18,3$ кПа, т.е. при напряжении в 1,4 раза больших, $\lambda = 0,82\%$ и $K_v = 2,2\%$, что примерно в 1,8 раза меньше по сравнению с предыдущим случаем. Таким образом, увеличение напряженности каолиновой массы приводит к уменьшению разброса критических величин ее поврежденности.

Для юрской глины при напряжении $\sigma_i = 41,6 - 55,0$ кПа среднеквадратическое отклонение (8 значений) составляет $\lambda = 1,18\%$ при коэффициенте вариации $K_v = 2,9\%$, что соответствует уровню разброса значений каолиновой массы.

При установившемся режиме деформации каолиновой массы и $\varpi = 32,2\%$ среднеквадратическое отклонение составило $\lambda = 3,4\%$, а $K_v = 10,5\%$, что существенно

больше по сравнению с режимом быстрого разрушения. Таким образом, для разрушения каолиновой и юрской глин определен сравнительно узкий (по сравнению с поликристаллическим цинком [11]) коридор разброса величин поврежденности структуры, который также существенно уменьшается при переходе от установившейся деформации к режиму быстрого разрушения.

Сравнение условий разрушения поликристаллического цинка, бетона и глин показывает, что с ростом пластичности материала в этом случае требуется увеличение уровня поврежденности структуры. Так, для поликристаллического цинка [11] уровень начала разрушения соответствует поврежденности структуры примерно $\omega_0 = 0,2 - 0,22$. Для бетона [10] при общей пористости более 25-30 % ($\omega_0 > 0,25 - 0,3$) материал теряет прочность. Для каолиновой массы разрушение может происходить уже при $\omega = 0,36$ (36 % поврежденности структуры), для юрской глины – при $\omega \geq 0,396$ (39,6 %).

Хотя приведенных примеров маловато, но общая тенденция вполне понятна и физически достаточно обоснована, так как с повышением пластичности материала увеличивается возможность релаксации повреждений внутренней структуры.

Как видно из рисунка 2, на котором графически представлены табличные данные, приведенные в [14], процесс изменения поврежденности структуры каолиновой массы под действием напряжений можно разделить на 3 зоны.

Первая зона соответствует затухающей деформации каолиновой массы, которая происходит при напряжении до $\sigma \leq 9,0 - 9,5$ кПа. Вторая зона соответствует установившейся и прогрессирующей деформациям, что происходит при $\sigma > 9,0$ кПа. Переход от установившейся к прогрессирующей деформации в значительной мере зависит от продолжительности действия и величины напряжений. Поэтому вторая зона имеет своеобразный вид и в 2-3 раза растянута по степени поврежденности структуры каолиновой массы по сравнению с зонами затухающей деформации и итогового разрушения. Третья зона соответствует итоговому разрушению каолина и начинается при $\sigma \geq 10,0$ кПа. Ширина этой зоны относительно невелика и примерно соответствует первой зоне.

Индивидуальные свойства глинистых, а тем более формовочных масс с различными характеристиками шихты, безусловно, определяют соответствующие зоны разрушения и трещинообразования. Повреждение структуры глинистой массы должно приводить к существенному уменьшению ее прочностных свойств. Такое повреждение структуры может быть достигнуто различными способами: механическим, физико-химическим и многими другими.

Водозащите горных выработок при налегающих породах, представленных глинистыми отложениями, уделяется значительное внимание в [15]. Здесь справедливо отмечено, что несущая и водозащитная функции комплекса горных пород в зонах сдвига взаимосвязаны. Однако приведенные приближенные оценки величины зоны трещиноватости являются заниженными по сравнению с рекомендованной ранее безопасной мощностью ВЗТ (200÷300 м [16]). Кроме этого, в [15] рассмотрены механизм и модель поступления рассолов в горные выработки из налегающих глинистых отложений, что представляет существенный интерес также для понимания процессов взаимодействия воды и рассолов с глинистыми породами. Здесь, в частности, описаны процессы поступления в горные выработки рассолов из глинисто-мергелистой толщи (ГМТ), что характерно для части Старобинского месторождения калийных солей.

При ведении очистных работ возникают значительные градиенты давления, происходит вторичная консолидация налегающих пород вследствие отжатия воды из глинистых, (дисперсных) пород и перераспределения давления между водой и скелетом грунта. В [16] глинисто-мергелистая дисперсная среда рассматривается как грунтовая

масса, которая достаточно полно водонасыщена и содержит свободную гидравлически непрерывную воду, что находит подтверждение в результатах испытаний образцов ГМТ на дополнительную водопроницаемость, которая в среднем для 13 глубин (177,2-579 м) составила около 1 % [6]. Далее рассмотрена схема отжатия поровых вод из ГМТ при мгновенном снятии горного давления при подработке породного массива и получено аналитическое выражение в виде дифференциального уравнения второго порядка для оценки отжима связанной воды. При истечении воды из ГМТ геостатическое давление будет перераспределяться в пользу давления, приходящегося на скелет грунта, которое будет возрастать.

Поэтому вследствие сочетания сложнейших процессов изменения напряженного состояния, структурных особенностей, влажности и гидравлических характеристик ГМТ, возможности «залечивания» трещин, образовавшихся в результате подработки породного массива, нуждаются в более тщательном исследовании по сравнению с [6, 17, 18].

Как видно из приведенных данных, в зависимости от природных (горно-геологических) и технологических (производственно-технических) условий разработки полезного ископаемого расчетная деформация растяжения по сравнению с допустимой может изменяться в 4 раза, что требует надежного теоретического и экспериментального доказательства. Поэтому до сих пор это предложение М.И. Шимана [19] не попало в нормативные документы.

По-видимому, предложение М.И. Шимана [19], кроме соляных пластов, в первую очередь, можно применить к глинистым отложениям, которые обладают большой пластичностью. При этом необходимо учесть, что наличие в ВЗТ глинистых пластов может явиться существенным фактором водозащиты [20]. Поэтому особенности процессов деформации различных глинистых пород, присутствующих в составах ВЗТ, при возможных режимах опускания в случае подработки нуждаются в глубоком изучении.

Для оценки особенностей водозащиты горных выработок при разработке Старобинского калийного месторождения большой интерес представляют монография [20] и учебник для студентов горных факультетов [21]. Так, для Старобинского месторождения при отработке второго калийного горизонта столбовой системой с обрушением кровли зона трещин в надсолевых отложениях определяется зависимостью [21]:

$$h_{тн} = 100m_r, \quad (4)$$

где m_r – выемочная мощность пласта второго горизонта, м.

В соленосных отложениях при отработке второго горизонта высота трещинообразования определяется зависимостью [21]:

$$h_r = 45(m_v + m_n)^{0.5}, \quad (5)$$

где m_v и m_n – мощности верхнего и нижнего слоя пласта, м.

Как видно из этих формул, зона распространения трещин в надсолевых отложениях в разы больше по сравнению с соленосными отложениями, что, по-видимому, объясняется существенной пластичностью последних.

Для массива, сложенного слоистыми глинистыми породами, безопасную глубину подработки водоемов в зависимости от содержания глин и глинистых сланцев в покрывающей толще рекомендуется определять по формуле [21]:

$$H_6 = \frac{38Hm}{8i + i_1 + 0,34H}, \quad (6)$$

где H – глубина разработки, м;

m – вынимаемая мощность пласта, м;

i и i_1 – суммарные мощности слоев глин и глинистых сланцев, аргиллитов, залегающих между водным объектом и отрабатываемым пластом, м.

Если в этой формуле принять $i = i_1 = 0$ (глины и глинистые породы отсутствуют), то $H_c \approx 110m$, что примерно соответствует выражению (4). Чем больше глубина отработки пласта, тем меньше влияние глин и глинистых сланцев, что связано с ростом гидравлического напора воды. Поэтому при подземном расположении водоносного горизонта аналогом глубины H является величина расстояния по вертикали между отрабатываемым пластом и водоносным горизонтом.

Следует отметить, что ни в одной из опубликованных работ не приведено оценки надежности рекомендуемых формул, что свидетельствует о недостаточности наших знаний о водозащитных свойствах подработанной толщи пород.

Неоднократная подработка ГМТ, связанная с последовательной отработкой нескольких продуктивных горизонтов (на I руднике Старобинского месторождения уже отрабатываются 3 горизонта), приносит дополнительные сложности в оценке водоустойчивости ГМТ. Отработка I самого верхнего горизонта, имеющего относительно небольшую мощность ВЗТ (150 ± 30 м с надежностью более 95 %), производится в последнюю очередь после отработки II и III горизонтов, расположенных глубже. Здесь следует заметить, что затопление рудника БКПРУ-3 в 1986 г. Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей произошло при ВЗТ мощностью около 135 м [16].

При последовательной отработке продуктивных пластов подрабатываемые породы [21] испытывают периодическую смену нагрузки с разгрузкой, что сопровождается гистерезисными явлениями проницаемости, по крайней мере, [17] в глинистом доломите и каолининовой глине.

Деформационные критерии прочности многих горных пород по мнению И.Х. Габдрахимова [18] не являются величинами постоянными, как принято считать в теории сопротивления материалов, а зависят от режимов нагружения или деформации в текущий и предшествующий периоды времени. По этому вопросу С.С. Вялов замечает [14]: «строго говоря, величина деформации, соответствующая моменту разрушения, изменяется в зависимости от времени до разрушения t_p или, что то же самое, в зависимости от величины напряжения τ – вначале возрастает до некоторого максимума, а затем снижается по мере увеличения времени t_p ». Поэтому принятие в качестве критерия разрушения постоянство предельной величины деформации ползучести, являющейся константой для данной породы, не зависящей от величины напряжения или времени до разрушения, является достаточно условным.

При испытании каменной соли [18] обнаружены две формы разрушения: вязкое (вязко-пластичное) и хрупкое, которое могло наступить при ускорении роста деформации. Так, при увеличении скорости деформирования с 0,01 до 1 мм/мин предельная деформация растяжения уменьшилась в 5-8 раз. Поэтому при изменении скорости оседания поверхности над отрабатываемыми калийными месторождениями от 0,3 до 190 мм/мес [19] отмеченные особенности разрушения пород могут иметь место.

Основываясь на изложенном, М.И. Шиман предложил [19] в качестве основного критерия безопасной разработки калийных пластов под водными объектами принять неравенство:

$$\varepsilon_{pp} K_d < \varepsilon_{pd}, \quad (7)$$

где ε_{pp} – расчетная деформация растяжения рассматриваемого пласта породы в зоне между поверхностью возможного обрушения и границей очистных работ;

K_d – коэффициент запаса, учитывающий интенсивность процесса сдвижения толщи пород в области активного деформирования;

ε_{pd} – допустимая деформация растяжения рассматриваемого пласта.

В качестве основного критерия интенсивности процесса сдвижения М.И. Шиманом рекомендуется [19] принимать максимальное ускорение опускания подработанной породной толщи, поскольку оно является результатом проявления сил, действующих в породном массиве. При этом на основании многолетнего безаварийного опыта разработки калийных пластов он установил следующие значения коэффициента запаса (интенсивности процесса) для различных категорий горных ситуаций; первая – $K_d = 0,5$; вторая – $K_d = 1$; третья – $K_d = 2$.

В заключение следует отметить, что исследование особенностей горно-геологических и производственно-технических условий разработки полезных ископаемых, а также свойств горных пород и их стохастических закономерностей, обеспечивающих высокую надежность защиты горных выработок от затопления, является первоочередной задачей специалистов горного дела и обусловлено огромной стоимостью рудников, а также возможными большими социальными потерями для их работников.

Следует также указать на недостаточную надежность определения положения кровли ВЗТ в пределах Старобинского месторождения калийных солей [22]. При этом минимальная мощность ВЗТ оценивается в 110 м.

Заключение

Высокий уровень стохастичности свойств породного массива требует не только общей оценки деформации растяжения и изгиба, но также определения характеристик трещинообразования и, в частности, размеров раскрытия трещин. Здесь особое значение имеют процессы пластичности и набухаемости при увлажнении породы. Поэтому необходимы новые исследования в указанных направлениях.

Список использованных источников

1. Глушко, В.Т. Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород / В.Т. Глушко, С.П. Гавеля. – М.: Недра, 1986. – 222 с.
2. Бурчаков, А.С. О закономерностях деформирования массива пород вокруг одиночных выработок / А.С. Бурчаков, И.Л. Черняк // Уголь. – 1969. – № 6. – С. 12-14.
3. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зорграф. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
4. Новицкий, П.В. Об особых свойствах 95 %-ной квантили большого класса распределений / П.В. Новицкий // Метрология. – 1979. – № 2 – С.18-24.
5. Глушко, В.Т. Реология горного массива / В.Т. Глушко, В.П. Чередниченко, Б.С. Усатенко. – Киев: Наукова думка, 1981. – 224 с.
6. Исследование основных физико-механических свойств пород и руд Старобинского месторождения калийных солей / А.А. Атрашкевич [и др.] // Вопросы добычи и переработки галургического сырья: сб. науч. ст. – М.-Л.: Химия, 1966. – С. 107-118.
7. Проскураков, Н.М. Физико-механические свойства соляных пород / Н.М. Проскураков, Р.С. Пермяков, А.А. Черников. – Л.: Недра, 1973.
8. Осипов, С.Н. Метановыделение при разработке пологих угольных пластов / С.Н. Осипов. – М.: Недра, 1964. – 256 с.

9. Сдвигание горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР / С.П. Авершин и [и др.]. – М.: Углетехиздат, 1958. – 272 с.
10. **Леонович, С.Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов / С.Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1996. – 266 с.
11. **Холодарь, Б.Г.** Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности / Б.Г. Холодарь // Строительство и архитектура (Вестник Брестского государственного технического университета). – 2005. – № 1. – С. 40-46.
12. **Богдан, С.И.** Модели и компьютерные технологии определения напряженно-деформированного состояния в подрабатываемых массивах горных пород с учетом формирования областей, находящихся в различном деформированном состоянии: автореф. дис. канд. техн. наук / С.И. Богдан; БНТУ. – Минск, 2005. – 21 с.
13. Структура и прочность подработанного массива и влияние их на устойчивость бортов карьера при комбинированном способе разработки / В.Т. Сапожников [и др.] // Современные проблемы механики горных пород: материалы IV всесоюзной конференции по механике горных пород, 1972. – Л.: Наука. – С. 81-84. .
14. **Вялов, С.С.** Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
15. **Смычник, А.Д.** Пособие по инженерным расчетам в горном деле (Инженерная геомеханика) / А.Д. Смычник, В.С. Усенко, Г.А. Щербаков. – Минск: Майнио, 2007. – 264 с.
16. Месторождения калийных солей Беларуси / Э.А. Высоцкий [и др.]; под ред. Э.А. Высоцкого, А.Д. Смычника. – Минск: БГУ, 2003 – 264 с.
17. **Гольдберг, В.М.** Проницаемость и фильтрация в глинах / В.М. Гольдберг, Н.П. Скворцов. – М.: Недра, 1986. –161 с.
18. **Габдрахимов, И.Х.** Исследование деформативности каменной соли на растяжение / И.Х. Габдрахимов, К.Г. Кадиев // Сдвигание земной поверхности и толщи на калийных месторождениях: сб. науч. ст. – Л.: Недра, 1977. – С. 106-112.
19. **Шиман, М.И.** Предотвращение затопления калийных рудников / М.И. Шиман. – М.: Недра, 1992. – 176 с.
20. **Турчанинов, И.А.** Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л.: Недра, 1977. – 368 с.
21. **Проскуряков, Н.М.** Управление состоянием массива горных пород / Н.М. Проскуряков. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
22. О положении кровли водозащитной толщи в пределах Старобинского месторождения калийных солей / А.А. Варгамов [и др.] // Геология месторождений калийных солей и их разведка: сб. науч. ст. / Л.: ВНИИГ, 1973. – С. 78-83.

Osipov S.N., Smychnik E.A., Shvab R.G.

Concerning the reliability assessment of the physical properties of waterproof rock mass while underground salt mining

The article presented the analysis of stochastic processes of rocks breaking and reliability assessment of their strength properties. Wide fluctuations of the rocks strength properties along the mine field require the improvement of assessment methodology of interbed waterproof parameters.

The effect of load working time as well as of rock plastic properties on the deformation and destruction process is shown, what is especially typical for clays.

Поступила в редакцию 13.01.2012 г.