

5. Основные реологические характеристики материалов диафрагмы и основания используются для составления интегро-дифференциальных уравнений совместной работы системы основание–диафрагма.

1. *Rembielak T., Hromek A., Platek J.* Zapobieganie pozarom endogenicznym i odwalon w scianie na drodze wyprzedzajacego iniekcynego uszczelniania i wzmacniania rozluzewanego gorotworu // Miedzynarodowa Konferencja III Szkola Geomechaniki. – Gliwice–Ustron, Polska, listopad 23–26, 1997. – s. 227–238.

2. *Rembielak T., Hromek A., Platek J.* Zastosowanie iniekcji uszczelniania i wzmacniania gorotworu w otoczeniu przecznicy 9 KWK "Kazimierz - Juliusz", przed i podczas, jej udrazniania, dla ograniczenia mozliwosci odnowienia i powstania nowych pozarow endogenicznych // VII Miedzynarodowe Sympozjum Geotechnika – Geotechnics 96. – Gliwice–Ustron, Polska, pazdziernik 22–25, 1996. – s. 159–170.

УДК 624.539.389.3

## **ПРОЦЕСС КОНСОЛИДАЦИОННОГО УПЛОТНЕНИЯ КАРБОНАТНЫХ СЛАНЦЕВ С УЧЕТОМ СТАРЕНИЯ СКЕЛЕТА ПОРОДЫ**

*Богдан Ковалец, докт.-инж. (Силезский технический университет)*

*Розглянуто розв'язання задачі консолідаційного ущільнення багатofазного масиву з урахуванням повзучості і старіння скелета породи. Отримано реальні параметри процесів, що протікають у масиві при експлуатації споруд, складених мулісто-карбонатно-сланцевими породами.*

Экспериментальные исследования показывают, что карбонатные сланцы, как и другие горные породы, склонны к выветриванию. Периодическое замерзание и оттаивание породы, ее увлажнение и высыхание, изменение атмосферных условий приводят к измельчению крупных частиц и вызывают

старение скелета породы. В данной статье сделана попытка рассмотрения реологического процесса как консолидационного уплотнения с учетом ползучести и старения скелета породы. При этом необходимо установить связь между напряжением  $\sigma$ , деформацией  $\epsilon$  и временем  $t$ . Предположим, что существует поверхность в координатах  $\sigma$ ,  $\epsilon$ ,  $t$ . Рассекая эту поверхность плоскостями, перпендикулярными осям координат  $\sigma$ ,  $\epsilon$  и  $t$ , получаем кривые ползучести при постоянном напряжении, кривые релаксации напряжений при постоянной деформации и графики зависимости напряжения от деформации для определенных значений времени. Деформация с учетом фактора времени характеризуется изохронными кривыми ползучести.

Если изохронные кривые ползучести подобны, т.е. могут быть получены из одной кривой умножением значений ее ординаты на некоторую величину, являющуюся функцией времени, то расчеты значительно упрощаются. В этом случае зависимость напряжения от деформации и времени может быть представлена в виде произведения двух функций, из которых  $\varphi(\epsilon)$  является функцией только деформации, а  $\psi(t)$  – функцией только времени, т.е.

$$\sigma = \varphi(\epsilon)\Psi(t). \quad (1)$$

Если  $\psi_{t=0} = 1$ , то функция  $\varphi(\epsilon)$  описывает процесс растяжения материала. Выражение (1) характеризует ускоренное выщелачивание илисто–карбонатно–сланцевых горных пород. Результаты экспериментов показывают, однако, что процесс старения карбонатно–сланцевых пород даже под влиянием жестких условий выветривания начинается не сразу, а через определенное время. Поэтому функция  $\psi(t)$  имеет вид

$$\Psi(t) = \frac{1}{1 + at^b}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты, учитывающие условия выветривания рассматриваемого материала. В случае постоянной деформации уравнение (2)

описывает релаксацию напряжений. Согласно теории старения построение кривой релаксации по кривым ползучести выполняется следующим образом.

Допустим, что известны кривые ползучести при различных напряжениях (рис.1). Для построения кривых релаксации на кривых ползучести при различных значениях напряжения  $\sigma_{t=0}$  проводим горизонтальную прямую на расстоянии  $\epsilon_{t=0} = \sigma_{t=0} / E$  от оси абсцисс. Точки пересечения этой прямой с кривыми зависимости деформации от времени определяют величины напряжений при определенных значениях времени. Полученные результаты можно легко перенести в координаты  $t$  и  $\sigma$  и построить кривые релаксации (рис. 2).

Поскольку, согласно закону Гука, полная деформация не изменяется во времени и соответствует начальному значению  $\epsilon_{t=0}$ , то в начальный момент времени для карбонатно–сланцевых горных пород закон Гука имеет вид

$$\epsilon = \epsilon_{t=0} = \frac{\sigma_{t=0}}{E},$$

где  $\sigma_{t=0}$  – напряжение в начальный момент времени. Тогда

$$\frac{\sigma_{(t=0)}}{E} = \frac{\sigma}{E} + \epsilon. \quad (3)$$

Из (3) следует, что с увеличением пластической деформации напряжение будет непрерывно уменьшаться. Пластическая деформация при релаксации не может увеличиваться беспредельно. Если допустить, что пластическая деформация достигла величины деформации при нагружении  $\epsilon_{t=0}$ , то напряжение в илито–карбонатно–сланцевых породах становится равным нулю.

Следует отметить, что в процессе ползучести пластическая деформация растет до величины, при которой происходит разрушение карбонатно–сланцевых пород. В процессе релаксации пластическая деформация не превышает величины деформации, образовавшейся при нагружении.

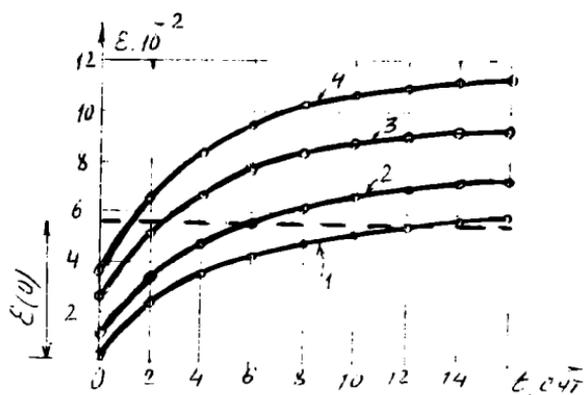


Рис. 1. Кривые ползучести иласто-кариозага сляндсвьял пород при различных значениях напряжения: 1 -  $\sigma = 0,1$  МПа; 2 -  $\sigma = 0,3$  МПа; 3 -  $\sigma = 0,5$  МПа; 4 -  $\sigma = 0,7$  МПа

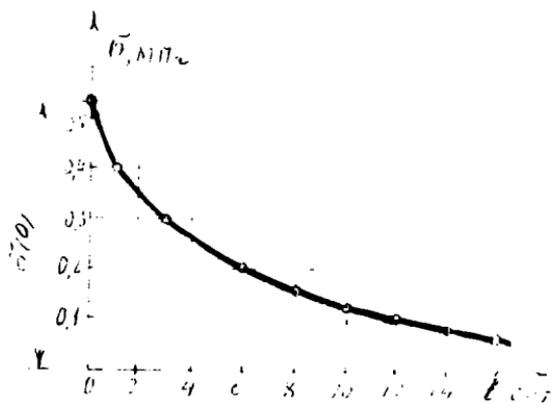


Рис. 2. Кривые релаксации в соответствии с теорией старения скелета породы

Из анализа рассмотренных выше уравнений вытекает вывод о необходимости учета процесса старения илесто–карбонатно–сланцевых пород при строительстве массивных сооружений, в особенности при решении задач, связанных с консолидацией и консолидационным уплотнением пород.

Для описания деформаций ползучести скелета илесто–карбонатно–сланцевых пород используем уравнение состояния из теории старения, которое для компрессионного сжатия имеет вид

$$\varepsilon_1(t) = m_{v1}\sigma_1(t) + m_{v3} \int_{t_1}^t \frac{\sigma_1(\tau)}{\tau} d\tau, \quad (4)$$

где  $m_{v1}$  – коэффициент мгновенной относительной сжимаемости;  $m_{v3}$  – коэффициент сжимаемости скелета породы при старении;  $\tau$  – отрезок времени, определяемый из условий наилучшего совпадения экспериментальной и теоретической кривых с применением метода наименьших квадратов.

При постоянной нагрузке это уравнение упрощается:

$$\varepsilon_1(t) = \sigma_1 \left( m_{v1} + m_{v3} \ln \frac{t}{t_1} \right), \quad (5)$$

т.е. описывает деформации ползучести скелета в период вторичной консолидации, когда напряжения в скелете пород практически постоянны.

Как известно, одномерная задача уплотнения при линейной наследственной ползучести многофазного массива из илесто–карбонатных сланцев сводится к решению дифференциального уравнения

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} + m_w n \frac{\partial P_w}{\partial t} = \frac{K_f}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_w}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Совместное решение уравнений (4) и (6) с учетом уравнения равновесия  $P = \sigma(z, t) + P_w(z, t)$  можно представить в следующем виде:

$$(1 + A_w) \frac{\partial P_w}{\partial N} - R_h \frac{P - P_w}{N} = \frac{\partial^2 P_w}{\partial \xi^2}, \quad (7)$$

где

$$A_w = n \frac{m_w}{m_{v1}}; R_h = \frac{m_{v3}}{m_{v1}}; C_v = \frac{K_f}{\gamma_w m_{v1}}; N = \frac{C_v t}{h^2}; \xi = \frac{z}{h} \quad \text{— безразмерные величины;}$$

$n$  — пористость массива;  $h$  — толщина слоя;  $m_w$  — коэффициент объемной сжимаемости;  $P_w$  — поровое давление;  $K_f$  — коэффициент фильтрации;  $\gamma_w$  — удельный вес поровой воды.

Уравнение (7) при граничных  $P_w(0, t) = 0$ ;  $\frac{\partial P_w(0, t)}{\partial z} = 0$  и начальном  $P_w(z, \tau_1) = P(z, N)A_0$  условиях может быть решено методом разделения переменных при равномерно распределенном давлении:

$$P_w(\xi, N) = \frac{4P}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n} \sin \frac{\pi n \xi}{2} f_n(N), \quad (8)$$

где

$$f_n(N) = (A_0 - 1) \left( \frac{N_1}{N} \right) \exp[-D_n(N - N_1)] + 1 - \frac{D_n N}{C_1 + 1} + \frac{D_n^2 N^2}{(C_1 + 1)(C_1 + 2)} - \frac{D_n^3 N^3}{(C_1 + 1)(C_1 + 2)(C_1 + 3)};$$

$$D_n = \frac{(\pi n)^2}{h^2(1 + A_w)}; C_1 = \frac{R_h}{1 + A_w}.$$

Выражение (8) для прогнозирования степени уплотнения массива во времени под действием равномерно распределенной нагрузки имеет вид

$$V_0(N) = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{1}{n^2} [f_n(N) + G_n(N)], \quad (9)$$

где

$$G_n(N) = \frac{A_0 - 1}{A_0} \left\{ 1 - \left( \frac{N_1}{N} \right)^{C_1} \exp[-D_n(N - N_1)] - D_n N_1 \exp(D_n N_1) \Phi(D_n N_1 C_1) \right\} + \\ + R_h \left[ \ln \left( \frac{N}{N_1} \right) - \frac{D_n N}{C_1 + 1} + \frac{D_n^2 N^2}{2(C_1 + 1)(C_1 + 2)} - \frac{D_n^3 N^3}{3(C_1 + 1)(C_1 + 2)(C_1 + 3)} + \dots \right]; \quad (10)$$

$\Phi(D_n N_1 C_1)$  – функционал, зависящий от аргумента  $D_n N$  с параметром  $C_1$ ;  $R_h$  – параметр старения илисто–карбонатно–сланцевых пород, определяемый отношением коэффициента сжимаемости при старении  $m_{v3}$  к коэффициенту мгновенной относительной сжимаемости  $m_{v1}$ .

В приведенных формулах, описывающих степень консолидации, было использовано отношение изменяющегося во времени уплотнения к уплотнению, достигнутому в период фильтрационной консолидации, поскольку в этом случае фильтрационное уплотнение отсутствует и консолидация развивается пропорционально логарифму времени (10). Однако это не свидетельствует о том, что уплотнение развивается бесконечно. Процесс уплотнения массива в период вторичной консолидации идет с затухающей скоростью, причем настолько медленно, что к периоду эксплуатации сооружений из илисто–карбонатно–сланцевых пород вторичное уплотнение завершится. Величина уплотнения  $S_v$  при действии равномерно распределенного давления определяется по формуле

$$S_v = m_{v1} hP. \quad (11)$$

Как видно из формул (6) и (11), при решении дифференциальных уравнений уплотнения многофазного массива параметры  $A_0$ ,  $A_w$ ,  $N$  зависят от параметров породы  $m_{v1}$ ,  $m_{v3}$ ,  $m_w$ ,  $\tau_1$ .

Следует отметить, что при низких значениях коэффициента фильтрации  $K_f$  массива (например, когда поры между крупными частицами породы заполнены мелкозернистыми частицами золошлаковой смеси) и больших размерах уплотняемого массива передача внешней нагрузки на скелет происходит медленнее. Деформация старения скелета илисто–карбонатно–

сланцевых пород во времени зависит от коэффициента фильтрации и геометрических параметров массива.

Если пористая среда обладает свойствами восстановления нарушенных связей между частицами и их агрегатами после приложения внешней нагрузки, то она обладает свойствами старения (тиксотропного упрочнения во времени).

Поскольку илесто-карбонатно-сланцевые породы имеют свойство с течением времени измельчаться, то при расчете консолидационного уплотнения необходимо учитывать старение скелета.

Если под сооружением из илесто-карбонатно-сланцевых пород залегает водонепроницаемый слой глинистого грунта, то фильтрация влаги из массива отсутствует и консолидационное уплотнение массива определяется соотношением

$$P_w(t) = P \left[ 1 - (1 - A_0) \left( \frac{t}{t_1} \right)^{-\delta} \right], \quad (12)$$

$$\text{где } \delta = \frac{m_{v3}}{m_{v1} + m_{vn}}.$$

Отсюда видно, что при  $t = t_1$  имеет место обычное начальное условие  $P_w(t_1) = PA_0$ , а при  $t \rightarrow \infty$  – начальное условие  $P_{w \rightarrow \infty} = P$ .

Экспериментальные исследования на одометре образцов илесто-карбонатно-сланцевых пород, просеянных через сито с отверстиями размером 5 мм, показали, что величина параметра старения определяется по формуле  $R_h = m_{v3}/m_{v1} = 0 \dots 0,1$ . При этих значениях  $R_h$  соответствует соотношению  $P_w/P_0 = 0,65 \div 0,85$ . Изменение  $P_w/P_0$  зависит от  $\lg N$ . В пределах  $\lg N = 10^{-3} \div 10^{-1}$  значение  $P_w/P_0$  в указанных пределах ( $R_h = 0 \dots 0,1$ ) не изменяется, а после  $\lg N = 10^{-1}$  резко падает и при  $\lg N = 10$  становится равным нулю. Значение  $V = S(N)/S_y = 0,4$  и при всех значениях  $R_h = 0 \dots 0,1$  до  $\lg N = 10^{-1}$  не изменяется, а затем с увеличением  $\lg N$  от 1 до  $10^2$  значение  $V$  увеличивается. Отметим, что при  $\lg N = 10$ ,  $R_h = 0$ ,  $V = 1 = \text{const}$ ;  $R_h = 0,02$ ,  $V = 1,2 = \text{const}$ ;

$R_h = 0,05$ ,  $V = 1,4 = \text{const}$ ;  $R_h = 0,1$ ,  $V = 1,8 = \text{const}$ . Эти данные показывают, что момент полного рассеивания порового давления соответствует перегибу кривой "осадка–логарифм времени" (рис. 3). Осадка (уплотнение) продолжается пропорционально логарифму времени после полного рассеивания порового давления. Относительное уплотнение массива из илесто–карбонатно–сланцевых пород с мелкозернистыми золошлаковыми смесями уменьшается с увеличением толщины слоя массива.

Рассмотрим процесс консолидации многофазного массива с одновременным учетом ползучести и старения скелета, поскольку в этом случае можно описать как характер развития порового давления, так и вторичную консолидацию во времени.

Решение задачи сводится к совместному рассмотрению уравнения одномерной консолидации (6) и уравнения наследственной ползучести скелета с экспоненциальным ядром:

$$\epsilon_1(t) = m_{v1}\sigma_1(t) - \int_{\tau_1}^t \sigma_1(t) \frac{\partial}{\partial \tau} m_{v0}(t, \tau) d\tau. \quad (13)$$

Эти уравнения описывают процесс старения массива из илесто–карбонатно–сланцевых пород:

$$m_{v0}(t, \tau) = m_{v1} + \left( m_{v2} + \frac{m_{v3}}{\tau} \right) \left[ 1 - e^{-\eta(t-\tau)} \right], \quad (14)$$

что приводит к дифференциальному уравнению

$$(1 + A_w) \frac{\partial^2 P_w}{\partial N^2} + \eta \left[ (1 + A_w + A_f) \frac{h^2}{C_v} + \frac{R_h}{N} \right] \frac{\partial P_w}{\partial N} = \left( \frac{\partial^3 P_w}{\partial \xi^2 \partial N} + \eta \frac{h^2}{C_v} \frac{\partial^2 P_w}{\partial \xi^2} \right), \quad (15)$$

где  $A_f = m_{v2}/m_{v1}$ ;  $m_{v2}$  – коэффициент мгновенной относительной сжимаемости после условно-стабилизированной осадки в период фильтрационной консолидации;  $\eta$  – вязкость поровой жидкости.

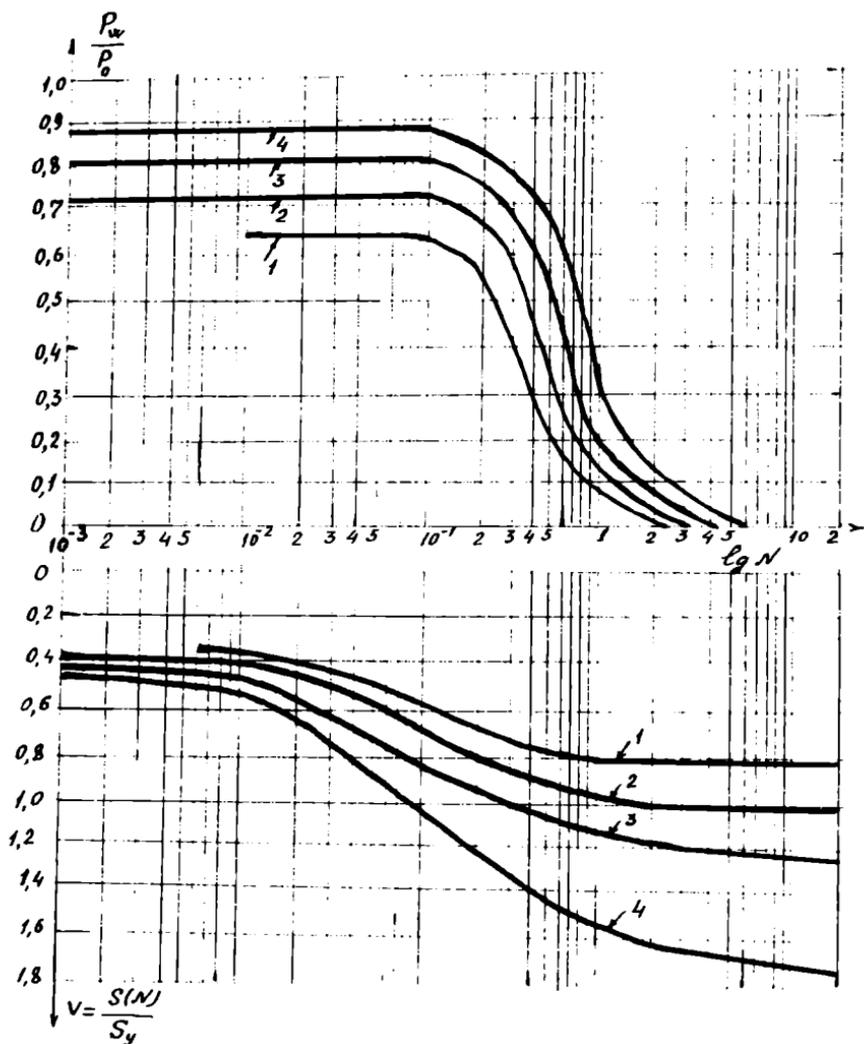


Рис. 3. Кривые консолидации при различных значениях параметра старения  $R_h$ : 1 -  $R_h = 0$ ; 2 -  $R_h = 0,02$ ; 3 -  $R_h = 0,05$ ; 4 -  $R_h = 0,1$

Решение уравнения (15) с начальными  $P_w(\xi, N_1) = P(\xi)A_0$ ;

$$P_w(\xi, N_1) = -P(\xi) \frac{\eta h^2}{c_v} \varphi(\tau_1) \frac{1 + A_0}{m_{v1} + nm_w} \text{ и граничными } P_w(0, N) = 0; \frac{\partial P_w}{\partial \xi_{l=1}} = 0$$

условиями при равномерно распределенной нагрузке можно представить в виде

$$P_w = (\xi, N) = \frac{4P}{\pi} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{N'}{n} \sin \frac{\pi n \xi}{2} [D_1 f(\beta, \gamma, x) + D_2 G(\beta, \gamma, x)] e^{\delta_n N}, \quad (16)$$

где

$$\beta_n = \frac{-\delta_n(2 - a_1) - b_n r}{\sqrt{b_n^2 - 4d_n}}; a_1 = \frac{\eta R_h}{1 + A_w}; \gamma = 2 - a_1;$$

$$b_n = \frac{\eta(1 + A_w + A_1)h^2 + C_v \left(\frac{\pi n}{2}\right)^2}{C_v(1 + A_w)}; r = 1 - a_1;$$

$$d_n = \frac{\eta h^2 \left(\frac{\pi n}{2}\right)^2}{C_v}; x = \sqrt{b_n^2 - d_n}; \delta_n = -\frac{b_n + \sqrt{b_n^2 - d_n}}{2}.$$

Постоянные  $D_1$  и  $D_2$  определяются из начальных условий, т.е.

$$D_1 = \frac{A_1 d_2 - A_2 d_1}{b_1 d_2 - b_2 d_1}; D_2 = \frac{A_2 b_1 - A_1 b_2}{b_1 d_2 - b_2 d_1}; A_1 = \frac{e^{-\delta_1 N_1} N_1^{-2}}{f(\beta, \gamma, x)};$$

$$b_1 = f(\beta, \gamma, x_1); b_2 = f(\beta, \gamma, x_1)(\delta + r N_1^{-1}) + f'(\beta, \gamma, x_1);$$

$$d_1 = G(\beta, \gamma, x_1); A_2 = \frac{e^{-\delta N_1} N_1^{-r} \eta h^2 \varphi(\tau_1) A_w}{(1 + A_w^2) C_v m_{v1}};$$

$$d_2 = G(\beta, \gamma, x_1)(\delta + r N_1^{-1}) + G'(\beta, \gamma, x_1); C_v = \frac{K_f(1 + \bar{e})}{\gamma_w \Delta l_{\max} a_k},$$

где  $e$  – коэффициент пористости консолидированной массы,  $a_k$  – экспериментальный параметр, МПа, определяемый из нелинейной компрессионной кривой на отрезке времени  $\tau_1$  по величинам начальных, конечных и изменяющихся во времени значений порового давления и

консолидационного уплотнения,  $\Delta l_{\text{пвк}} = l_{\text{нач}} - l_{\text{кон}}$  – приращение коэффициента пористости.

Полученные уравнения показывают, что скорость консолидации многофазного массива из илесто–карбонатно–сланцевых горных пород зависит от безразмерных параметров  $A_w$ ,  $A_i$ ,  $R_h$ ,  $N_1$ , которые, в свою очередь, определяются параметрами сжимаемости  $m_{v1}$ ,  $m_{v2}$ ,  $m_{v3}$ ,  $m_w$ .

Анализ полученных уравнений показывает, что изменение порового давления во времени имеет экстремальный характер, а уплотнение, после полного рассеивания порового давления, продолжает развиваться пропорционально логарифму времени и характеризует процесс консолидационного уплотнения. Верхний слой массива из илесто–карбонатно–сланцевых пород разрушается вследствие выветривания и сопротивляемость сооружения внешней нагрузке существенно снижается.

Решение задачи консолидационного уплотнения многофазного массива с одновременным учетом ползучести и старения скелета и сжимаемости поровой воды позволяет получить более реальные параметры процессов, протекающих в массиве при эксплуатации сооружений, сложенных илесто–карбонатно–сланцевыми породами с мелкозернистыми золошлаковыми добавками.

Для увеличения долговечности сооружений поверхностный слой массива необходимо обработать поверхностно-активными гидрофобными материалами.

1. *Kawalec B.* Problemy geotechniczne i gornicze wystepujace w dolinach rzek Kochlowski i Klodnicy oraz Potoku Chudowskiego // Konferencja Srodowiskowa Sekcji Mechaniki Gruntow i Skal oraz Fundamentowania Komitetu Inzynierii Ladowej i Wodnej PAN "Geotechnika w Osrodku Gliwickim". – Leszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Budownictwo. – Leszyt 80, 1995. – s. 105–118.

2. *Wspolnie Z., Gryczmanski M., Kowalec J.* Coal mining waste as a structural material in Polish civil and water engineering // 13<sup>th</sup> International Conference on Solid Waste Technology and Management. – Philadelphia, USA, 1997.