

## ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛЕССОВИДНЫХ СУГЛИНКОВ ПРИ ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ СЖАТИИ

Рассмотрено влияние гидростатических напряжений сдвига на объемную деформацию лессовидных суглинков в природной влажности. Проведены испытания образцов лессовидных суглинков в природной влажности  $W=0,08$  на 3-х осном сжатии и ползучести в приборе стабилометре и были определены физико-механические показатели и напряженное состояние грунтов.

Розглянуто вплив гідростатичних напружень зсуву на об'ємну деформацію лесовидних суглинків у природній вологості. Проведено випробування зразків лесовидних суглинків у природній вологості  $W = 0,08$  на 3-х осному стисненні і повзучості в приладі стабілометр і були визначені фізико-механічні показники і напружений стан ґрунтів.

The influence of shear stress on hydrostatics shear stress in loess soils natural moisture. The tests of samples of loess in the natural moisture soils  $W = 0,08$  on 3-axle compression and creep in the instrument stabilometr and identified physical-mechanical properties and stress state of soils.

В инженерной практике часто встречаются случаи, в которых основанием подземных сооружений являются структурно-неустойчивые грунты в виде лессовидных суглинков. Этот грунт при увлажнении даёт просадочные деформации. Поэтому применяют инженерные мероприятия в виде защиты от увлажнения, т.е. сохранение природной влажности, как приведены во многих литературных источниках, в т.ч. в трудах [1 ÷ 5].

Однако, при эксплуатации возведенных подземных сооружений на этих грунтах, все-таки просачивается влага под фундаментом, и основания увлажняются, происходит изменение объемной деформации и ползучести при гидростатических напряжениях сдвига в осевых и радиальных направлениях.

**Цель настоящей статьи** – определить объемные деформации и деформации ползучести в зависимости от среднего нормального напряжения во времени.

Гидростатические напряжения сдвига изменяют объемную деформацию лессовидных суглинков в природной влажности. Как известно, лессовидные суглинки при естественной влажности, примерно  $W = 0,04 \div 0,12$  по разному сопротивляются растяжению и сжатию. Силы внутреннего трения объемной деформации в этих грунтах зависят не только от гидростатического давления  $\sigma$ , но и от напряжений сдвига  $\sigma_i$ , выраженных интенсивностью нормальных и касательных напряжений. Тогда, общие напряжения  $\sigma$  и деформация  $\varepsilon$  будут функциями  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а так же  $f_1$  и  $f_2$  от деформации  $\varepsilon$  и напряжений  $\sigma$ , т.е.:

$$\sigma = \varphi_1(\varepsilon) + \varphi_2(\varepsilon_i, \sigma_i); \varepsilon = f_1(\sigma) - f_2(\sigma, \varepsilon_i), \quad (1)$$

где  $\sigma = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$  – среднее нормальное напряжение или гидростатическое давление;  $\varepsilon = (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)/3$  – средняя деформация, равная 1/3 объемной деформации  $\varepsilon_0$ ;

$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2$  – интенсивность касательных напряжений;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – компоненты нормальных;  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – пары касательных напряжений в случае изотропного материала;  $\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2]} + \gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2$  – интенсивность деформации сдвига;  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – компоненты нормальных;  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – пары касательных деформаций в случае изотропного материала.

Первый член уравнения (1) характеризует сопротивление лессовидного суглинка от гидростатических давлений  $\sigma$ , состоящих из средних нормальных компонентов напряжений, а второй – влияние на объемные деформации напряжений сдвига  $\sigma_i$ .

Для выяснения закономерности изменения объемного деформирования при гидростатических напряжениях сдвига были проведены испытания лессовидных суглинков на 3-хосном сжатие и ползучести в приборе стабилометр. Взятые пробы лессовидного суглинка имели следующие физико-механические характеристики:

Удельный вес частицы  $\gamma_s = 27,4 \text{ кН/м}^3$ ; удельный вес  $\gamma = 17,1 \text{ кН/м}^3$ ; пористость  $n = 46\%$ ; число пластичности  $-I_p = 0,192 - 0,10 = 0,092$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 24^\circ$ ; сила сцепления  $c = 0,086 \text{ МПа}$ ; природная влажность  $W = 0,08$ ; удельный вес сухого грунта  $\gamma_d = 14,1 \text{ кН/м}^3$ ; предел текучести  $W_L = 0,192$ ; предел раскатывания  $W_p = 0,10$ ; относительная просадочность  $\varepsilon_{si} = 0,14$ ; коэффициент фильтрации  $K_\phi = 2,6 \text{ см/час}$ .

Образцы имели форму цилиндров с соотношением высоты к диаметру, т.е.  $h/d = 2$ , диаметр  $d = 100 \text{ мм}$ .

Измеряли осевую  $\varepsilon_z$ , радиальную  $\varepsilon_x$  и объемную  $\varepsilon_0$  деформации при различных гидростатических давлениях ( $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = P = 3\sigma$ ), которые в течение каждого опыта поддерживались постоянным.

Были проведены две серии испытаний идентичных образцам-близнецам. Первая серия предусматривала поведение лессовидного суглинка объемных деформаций при гидростатическом сжатии в условиях ползучести. При испытании принимались величины среднего нормального напряжения  $\sigma_1 = 0,05 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_2 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_3 = 0,15 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_4 = 0,20 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_5 = 0,25 \text{ МПа}$ ;  $\sigma_6 = 0,3 \text{ МПа}$ . Время воздействия нагрузки были приняты  $t_1 = 30 \text{ сек}$ ;  $t_2 = 1 \text{ мин}$ ;  $t_3 = 5 \text{ мин}$ ;  $t_4 = 20 \text{ мин}$ ;  $t_5 = 40 \text{ мин}$ ;  $t_6 = 1 \text{ час}$ ;  $t_7 = 10 \text{ час}$ ;  $t_8 = 24 \text{ час}$ . Результаты испытаний приведены на рис.1, а. Все кривые имеют затухающий характер. Наиболее интенсивные нарастания объемной деформации наблюдается в начальный период времени; затем резко затухают и стабилизируются. При максимальных гидростатических давлениях  $\sigma_6 = 0,3 \text{ МПа}$  в течение  $t_6 = 1 \text{ час}$ , объемная деформация составила  $\varepsilon_0 = -0,77 \cdot 10^{-2} 1/\text{ч}$ , а в кон-

це опыта после  $t_8 = 24$  час оно стало  $\varepsilon_0 = -1,6 \cdot 10^{+2}$ , т.е. увеличилась примерно в 2,1 раза. Деформация до времени  $t_6 = 1$  час во всех значениях гидростатического давления растет быстро и является упругой, так как при разгрузке восстанавливается почти полностью, это видно из рис.1, а. Зависимости объемной деформации от среднего нормального напряжения  $\sigma$  для различных моментов времени воздействия загрузки от  $t_1 = 30$  сек до  $t_8 = 24$  часа показано на рис. 1, б.

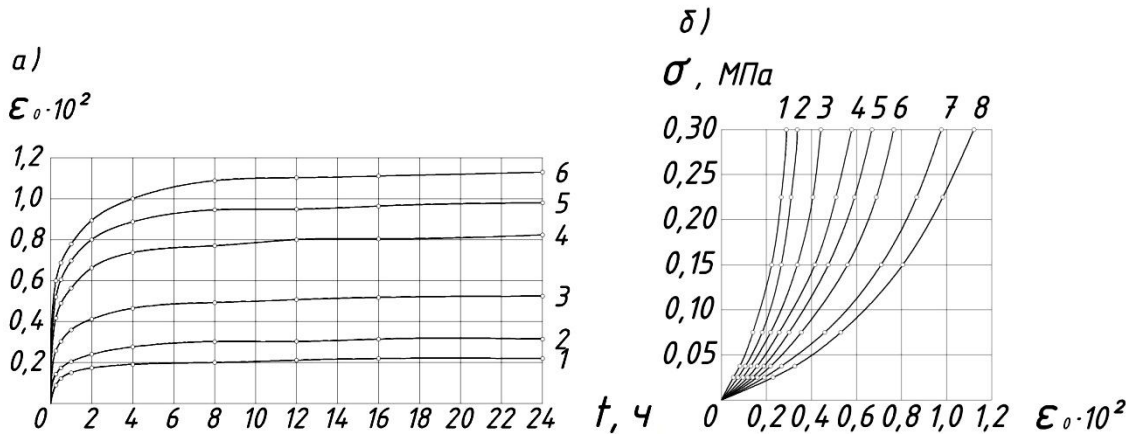


Рис. 1. Объемные деформации лессовидных суглинков при гидростатическом сжатии: а – кривые ползучести объемных деформаций при различных значениях среднего нормального напряжения: 1- $\sigma = 0,05$  МПа; 2- $\sigma = 0,10$  МПа; 3- $\sigma = 0,15$  МПа; 4- $\sigma = 0,20$  МПа; 5- $\sigma = 0,25$  МПа; 6- $\sigma = 0,30$  МПа; 1- $t_1 = 30$  сек.; 2- $t_2 = 1$  мин.; 3- $t_3 = 5$  мин.; 4- $t_4 = 20$  мин.; 5- $t_5 = 40$  мин.; 6- $t_6 = 1$  ч.; 7- $t_7 = 10$  ч.; 8- $t_8 = 24$  ч.; б – зависимость объемной деформации от среднего нормального напряжения для различных моментов времени воздействия нагрузки

Опыты второй серии предусматривали изучение влияния напряжений сдвига на объемную деформацию лессовидного суглинка природной влажности  $W = 0,08$ . Испытания проводились при различных соотношениях  $\sigma_z$  и  $\sigma_x = \sigma_y$ . Эти соотношения подбирали так, чтобы в опытах каждой серии величина среднего нормального напряжения сохранялась постоянной, а интенсивности абсолютной величины касательных напряжений  $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} |\sigma_x - \sigma_y|$  были различными для каждого из испытываемых образцов, но неизменными в процессе опыта. Испытания проводились при величине среднего нормального напряжения  $\sigma_1 = 0,05$  МПа;  $\sigma_4 = 0,20$  МПа;  $\sigma_6 = 0,3$  МПа по 3 шт. образцов-близнецов. Для I-ой серии были испытаны всего 9 шт. образцов-близнецов и II-ой серии 12 шт., а именно при  $t_1 = 30$  сек;  $t_3 = 5$  мин;  $t_6 = 1$  час и  $t_8 = 24$  часа.

Результаты опытов при среднем нормальном напряжении  $\sigma_4 = 0,20$  МПа показаны в виде кривых ползучести в координатах  $\varepsilon_z \approx t$ ,  $\varepsilon_x \approx t$  и  $\varepsilon_0 \approx t$  на рис.2, а, б и в., которые характеризуют процесс развития осевых  $\varepsilon_z$ , радиальных  $\varepsilon_x$  и объемных  $\varepsilon_0$  деформаций образца во времени  $t$ .

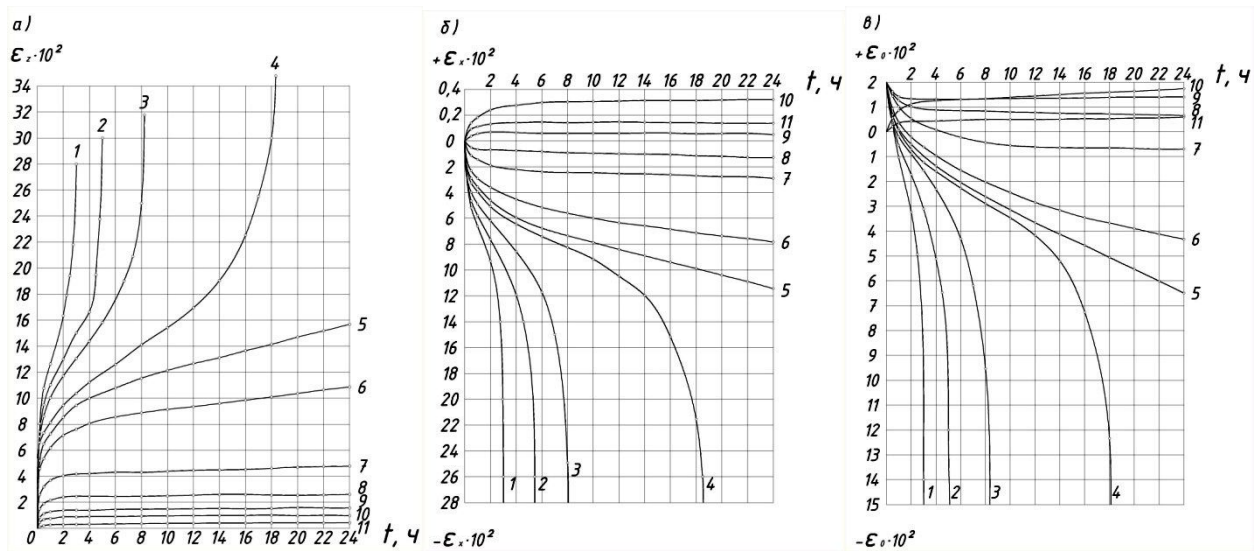


Рис. 2. Кривые ползучести осевых (а), радиальных (б) и объемных деформаций (в) лессовидных суглинков при различных значениях интенсивностей касательных напряжений сдвига. 1-0,26; 2-0,24; 3-0,22; 4-0,18; 5-0,16; 6-0,14; 7-0,12; 8-0,09; 9-0,06; 10-0,13; **11 –  $\sigma_1$  МПа**

Из рисунка  $\varepsilon_z \approx t$  (рис.2,а) видно, что в условиях трехосного сжатия при  $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_t$  процесс деформирования лессового суглинка во времени имеет три стадии ползучести: а) неустановившаяся ползучесть - характеризуемая нарастанием скорости деформирования, зависящей от величины касательных напряжений  $\sigma_t$ ; б) полу-установившаяся ползучесть. Здесь скорость деформирования начинает стабилизироваться. Радиальные деформации могут быть в виде сжатия (положительное) и расширения (отрицательное) значение. При малых величинах  $\sigma_t$  образцы сжимаются (происходит уплотнение), а при больших величинах  $\sigma_t$  происходит разрыхление (расширение); в) установившаяся ползучесть. Здесь скорость деформации стабилизируется.

На рис. 2, б, показаны кривые ползучести радиальных деформаций при различных значениях напряжений сдвига  $\sigma_t$ .

Как видно из рис. 2. б, при малых величинах  $\sigma_t$  (примерно,  $\sigma_t = 0,03 \div 0,14$  МПа) происходит уплотнение, а после начинается разуплотнение, т.е. знаки деформации изменяются. Причем после 2÷4 времени деформация ползучести стабильно уменьшается.

На рис.2, в, показаны кривые объемной деформации ползучести во времени. Здесь объемные деформации определены по данным измерений осевых  $\varepsilon_z$  и радиальных  $\varepsilon_x$  деформаций и уточняли непосредственные измерения объемов образца в процессе опытов, которые были установлены в завернутом виде в полиэтиленовую пленку в виде цилиндрической формы с наружными размерами диаметром  $d=100$  мм, высотой  $h=200$  мм.

Из графика рис.2, в видно, что в начальный момент времени при всех значениях напряжений сдвига  $\sigma_t$  было зафиксировано значительное уменьшение

объемов образцов-близнецов. При малых значениях напряжений сдвига  $\sigma_i$  (кривые 6 и 7) происходит дальнейшее уменьшение образца. Кривые ползучести имеют затухающий характер. При больших значениях напряжений сдвига  $\sigma_i = 0,26$  МПа и более уплотнение лессовидного суглинка наблюдается только в начальный момент времени  $t=2$  часа, затем происходит увеличение его объема – тем в большей степени, чем больше  $\sigma_i$  тем и больше разрыхление.

На рис. 3, приведены зависимость объемной деформации  $\epsilon_0$  от интенсивности касательных напряжений сдвига  $\sigma_i$  для различных моментов времени воздействия нагрузки.

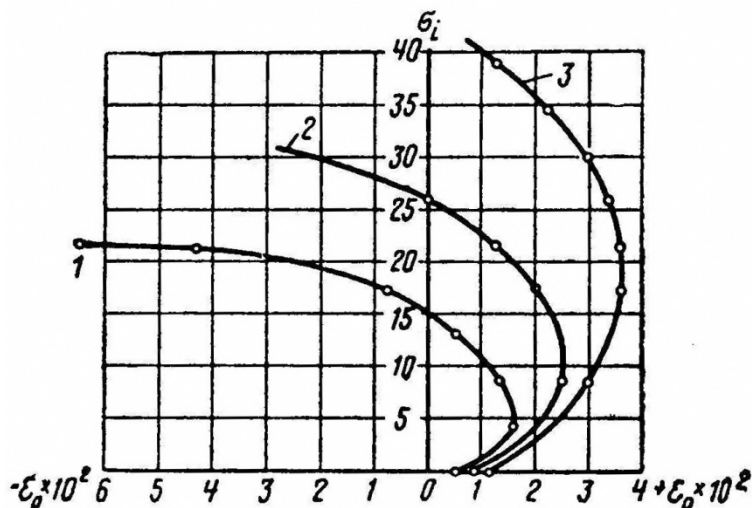


Рис. 3. Зависимость объемной деформации  $\epsilon_0$  от интенсивности касательных напряжений сдвига  $\sigma_i$ , при различных значениях среднего нормального напряжения  $\sigma$ : 1- $\sigma = 0,10$  МПа; 2- $\sigma = 0,20$  МПа; 3- $\sigma = 0,30$  МПа

Здесь дана измененная деформация ползучести для величины среднего нормального напряжения кривая. Из этого графика видно, что деформация, вызванная гидростатическим давлением, за время от 30 сек до 24 ч. Увеличилась от  $\epsilon_0 = -0,26 \cdot 10^2$  до  $-0,50 \cdot 10^2$ , т.е. почти в 2 раза. Дополнительное уплотнение под воздействием напряжений сдвига при  $\sigma_i = 0,15$  МПа в свою очередь увеличилось примерно в 2 раза, а разуплотнение по отношению к первоначальному объему за 24 ч. увеличилось более чем в 6 раз.

**Выводы.** Результаты опытов показывают существенное влияние напряжений сдвига на объемную ползучесть лессовидных суглинков при природной влажности. Причем это влияние в зависимости от величины напряжений сдвига  $\sigma_i$  проявляется как в виде уплотнения, так и разуплотнения.

#### Список литературы

1. Гельфандбейн А.М., Гелис Л.А. Методические рекомендации по проектированию оснований промышленных зданий, возводимых на просадочных грунтах. Харьков: Промстой проект, – 1981, – 103с.

2. Клепиков С.Н., Вайнберг А.С. Методические рекомендации по расчету естественных и преобразованных массивов просадочных грунтов при замачивании. Изд. НИИСК Госстроя СССР, г. Киев, – 1983 – 75с.
3. Самедов А.М. О реологических моделях лессовых просадочных грунтов.//Вісник НТУУ"КПІ", серія „Гірництво”, вип. 3., Київ, –2003. –с. 39-44.
4. Самедов А.М. Расчет и проектирование оснований и фундаментов (учебник на азерб. яз.) Изд-во „Маариф”, г. Баку. – 1992. –494 с.
5. Самедов А.М., Білоус Н.Г. Про реологічні особливості лесового ґрунту II типу просадності.//Вісник НТУУ"КПІ", серія „Гірництво”, вип. 2., Київ, –2000р. –с. 7-11.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Дриженком А.Ю.  
Надійшла до редакції 03.06.2013*

УДК 622.6-52

© А.В. Бакутін

## **БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

Виконано обґрунтування використання багатокритеріальної оптимізації систем керування електромеханічними системами.

Выполнено обоснование использования многокритериальной оптимизации систем управления электромеханическими системами.

The ground is executed of the use of multicriterion optimization of the systems of management by the electromechanics systems

**Вступ.** Актуальною задачею побудови систем автоматичного керування електромеханічними комплексами є забезпечення якості роботи за декількома критеріями якості, що визначаються особливостями роботи виконавчого механізму, наприклад: точність відпрацювання завдання керування, швидкодія системи, простота реалізації тощо.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час теорія систем оптимального керування дозволяє визначити структуру та параметри регуляторів будь-якої складності для лінійних, лінеаризованих та нелінійних об'єктів керування [1, 2]. Проте оптимізація закону керування, параметрів регулятора, тощо виконується доволі часто лише за одним критерієм якості.

**Мета роботи.** Обґрунтування використання багатокритеріальної оптимізації систем керування електромеханічними системами.

**Матеріали досліджень.** Багатокритеріальне конструювання дозволяє за наперед заданими характеристиками об'єкта керування, характеристиками збурення та обмежень, що накладені на електромеханічну систему визначити структуру та оптимальні параметри пристрою керування. Важливою умовою використання цього підходу є наявність алгоритмів, які дозволяють побудувати сукупність адекватних математичних моделей регуляторів, а математичні моделі