

УДК 624.131.4

А. М. Самедов, д.т.н., проф., М. А. Сницарь, асп. (НТУУ «КПІ»)

## НАБУХАНИЕ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

A. M. Samedov, M. A. Snitsar (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

## SWELLING OF CLAY SOIL UNDER HYDROTHERMAL CONDITIONS

*Проведены испытания образцов набухающих грунтов при увлажнении водой  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более. Получены относительные деформации набухания  $\varepsilon_{sw}$  при температурах воды  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более, при различных уплотняющих давлениях  $P_i$ , МПа, во времени  $t=0\div 72$  сут. Предложены формулы в виде степенной функции набухания глины при увлажнении водой  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более, с коэффициентом  $n_T$ , зависящим от температуры воды, с учетом реологических параметров набухающих глин.*

**Ключевые слова:** набухание глины, относительные деформации, уплотняющие давления, реологические параметры, абсолютная деформация.

*Проведено випробування зразків ґрунтів, що набухають при зволоженні водою  $T = 18 \div 20^{\circ}\text{C}$  і  $T = 40 \div 80^{\circ}\text{C}$  і більше. Отримано відносні деформації набухання  $\varepsilon_{sw}$  при температурах води  $T = 18 \div 20^{\circ}\text{C}$  і  $T = 40 \div 80^{\circ}\text{C}$  і більше, при різних ущільнюючих тисках  $P_i$ , МПа, в часі  $t = 0 \div 72$  діб. Запропоновано формули у вигляді степеневі функції набухання глини при зволоженні водою  $T = 18 \div 20^{\circ}\text{C}$  і  $T = 40 \div 80^{\circ}\text{C}$  і більше, з коефіцієнтом  $n_T$ , залежним від температури води, з урахуванням реологічних параметрів глин, що набухають.*

**Ключові слова:** набухання глини, відносні деформації, ущільнюючий тиск, реологічні параметри, абсолютна деформація.

*The samples were tested swelling soils when wetted with water  $T = 18 \div 20^{\circ}\text{C}$  and  $T = 40 \div 80^{\circ}\text{C}$  or more. Obtain the relative deformation of swelling  $\varepsilon_{sw}$  when water temperatures  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  and  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  or more at various sealing pressure  $P_i$ , МПа, at time  $t=0\div 72$ days. The formulas in the form of a power function of the deformation of clay swelling when moistened with water  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  and  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  and with a coefficient  $n_T$  depending on the temperature of the water, taking into account the rheological parameters of swelling clays.*

**Keywords:** swelling clay, the relative deformation, sealing pressure, rheological parameters, the absolute deformation.

**Введение.** В литературных источниках [1-6] приведены процессы набухания глинистых грунтов, однако в них отсутствуют показатели поведения

набухающих глинистых грунтов при гидротермальных процессах, т.е. влияние температуры воды при увлажнении на свойства набухания.

**Цель и задачи.** Провести испытания образцов набухающих грунтов при увлажнении водой  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более.

Получить относительные деформации набухания  $\varepsilon_{sw}$  при температурах воды  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более, при различных уплотняющих давлениях  $P_i$ , МПа, во времени  $t=0\div 72$  сут.

Предложить формулы функции набухания глины при увлажнении водой  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более.

**Результаты исследований.** Набухание в глинистых грунтах, связано с физико-механическими; химико-реологическими процессами, происходящими как внутри порового пространства, так и в кристаллическом строении минеральных частиц, которые относятся к реологическим неравновесным процессам. Деформации набухания относятся к нестационарным процессам и развиваются во времени. Поэтому они характеризуются реологическим явлением и зависят от свойства и температуры влаги, которая взаимодействует с минералогическими частицами набухающих глин. Величина и скорость деформации набухания зависит от различных факторов. Твердые частицы набухающих глин заряжены отрицательно, а молекулы воды во время увлажнения представляют собой диполи и заряжены положительным зарядом. При соприкосновении твердой минеральной частицы с водой возникают электромолекулярные силы взаимодействия, которые притягивают диполи воды к поверхности минеральных частиц с огромной силой. При этом, чем больше удельная поверхность частиц (чем меньше крупность минеральных частиц), тем больше количество молекул воды будет находиться в связанном состоянии. Набухание и усадка глинистых грунтов являются обратимыми процессами во времени, и характеризуются реологическими процессами, и подчиняются наследственным проблемам ползучести и релаксации.

В компрессионном приборе и в стабилometре проводились серийные испытания образцов из набухающих монтмориллонитовых и бентонитовых глин при увлажнении водой с температурой  $T=18^{\circ}\text{C}\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40^{\circ}\text{C}\div 80^{\circ}\text{C}$  и более. Изучалось изменение относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  при давлении  $0\div 1,6$  МПа во времени 72 сут. В каждом случае замерялась величина  $\varepsilon_{sw}(P, t)$  во времени  $0\div 72$  сут, а потом были построены графики зависимости  $\varepsilon_{sw}(P, t)$  во времени  $t_i$ ,  $P_i$  и сопоставлены формы изменения от температуры воды (рис. 1)  $T=18^{\circ}\text{C}\div 20^{\circ}\text{C}$  и  $T=40^{\circ}\text{C}\div 80^{\circ}\text{C}$  и более.

Замерялись  $\varepsilon_{sw}(P, t)$  во времени  $t=80$  сут. при различном увлажнении  $W=0\div 0,2$  и  $W_{sat}=0,42$  и давлениях  $P_i=0\div 1,6$  МПа.

Образцы из монтмориллонитовой глины при испытании имели следующие показатели: предел текучести  $W_L=0,36$ ; предел раскатывания  $W_p=0,15$ ; число пластичности  $I_p=W_L-W_p=0,36-0,15=0,21$ ; природная

влажность  $W = 0,09$ ; удельный вес частиц глины  $\gamma_s = 27,1 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; удельный вес частиц глины в природном состоянии  $\gamma = 17,2 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; удельный вес в сухом состоянии  $\gamma_d = 13,8 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; пористость  $n = 38\%$ ; гранулометрический состав (0,001 мм) - 34%.

Образцы из бентонитовой глины при испытании имели следующие показатели: предел текучести  $W_L = 0,44$ ; предел раскатывания  $W_p = 0,17$ ; число пластичности  $I_p = W_L - W_p = 0,44 - 0,17 = 0,27$ ; природная влажность  $W = 0,11$ ; удельный вес частиц глины  $\gamma_s = 26,8 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; удельный вес частиц глины в природном состоянии  $\gamma = 16,9 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; удельный вес в сухом состоянии  $\gamma_d = 13,4 \text{ кН} / \text{м}^3$ ; пористость  $n = 43\%$ ; гранулометрический состав (0,001 мм) - 42%.

Следует отметить, что деформацию набухания глины при увлажнении водой  $T = 18^\circ\text{C} \div 20^\circ\text{C}$  или  $T = 40^\circ\text{C} \div 80^\circ\text{C}$ , развивающуюся во времени при постоянной влажности  $W = \text{const}$  и давлении  $P = \text{const}$  можно считать явлением ползучести. Наиболее удобной для описания закономерностей деформирования набухающих глин при увлажнении водой  $T = 18^\circ\text{C} \div 20^\circ\text{C}$  и  $T = 40^\circ\text{C} \div 80^\circ\text{C}$  и более во времени, будет теория старения, предложенная Ю.Н. Работновым. Согласно теории старения, между деформацией набухания, уплотняющим напряжением и временем при постоянной влажности и  $T = 18^\circ\text{C} \div 20^\circ\text{C}$ , а также  $T = 40^\circ\text{C} \div 80^\circ\text{C}$  и более, существует зависимость следующего вида:

$$F(\varepsilon_{sw}, P, t) = 0. \quad (1)$$

Теория старения Ю.Н. Работнова рассматривает семейства диаграмм «напряжение-деформация» во времени. Если указанные кривые семейства диаграмм окажутся подобными, тогда в соответствии с этой теорией зависимость относительного набухания  $\varepsilon_{sw}(P)$  от уплотняющих напряжений и времени можно представить в виде произведения двух функций, одна из которых  $f(P)$  - функция только напряжения, а другая  $\psi(t)$  - только во времени:

$$\varepsilon_{sw}(P, t) = f(P) + \psi(t). \quad (2)$$

Функцию ползучести во времени  $\psi(t)$  принимают такой, чтобы  $\psi_0 = 1$ ; следовательно, функция  $\varepsilon_{sw}(P, 0) = f(P)$  описывает изохронную кривую  $P = f_1(\varepsilon_{sw})$  для мгновенной деформации.

Теорию старения характеризует напряженно-деформированное состояние в зависимости от времени. Поэтому, рассмотрим изменение относительного набухания во времени при различных значениях уплотняющих давлений  $P_i$  во времени  $t$ , как приведено на рис. 1.

Изменение относительной деформации набухания  $\varepsilon_{sw}(P, t)$  при максимальном времени  $t = 80 \text{ сут.}$  в процессе увлажнения водой приведено в левой части рис. 1 при различных уплотняющих давлениях  $P_i = 0 \div 1,6 \text{ МПа}$ , а в правой части приведено зависимость  $\varepsilon_{sw}(P, t)$  при различных давлениях  $P_i, \text{ МПа}$  в процессе увлажнения водой  $T = 20^\circ\text{C}$ , и водой  $T = 60^\circ\text{C}$  на ползучесть. Из рис. 1 видно, что при всех значениях уплотняющих давлений процесс протекает

весьма интенсивно в течении первых 5÷8сут. (при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$ ) и 3÷4сут. (при увлажнении  $T=60^{\circ}\text{C}$ ). Начиная с 10÷15сут. процесс набухания при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$  носит затухающий характер и стабилизируется, а при увлажнении водой  $T=60^{\circ}\text{C}$  процесс набухания начинается на 6÷8сут, и стабилизация протекает, примерно в 1,4÷1,8 раза быстрее.

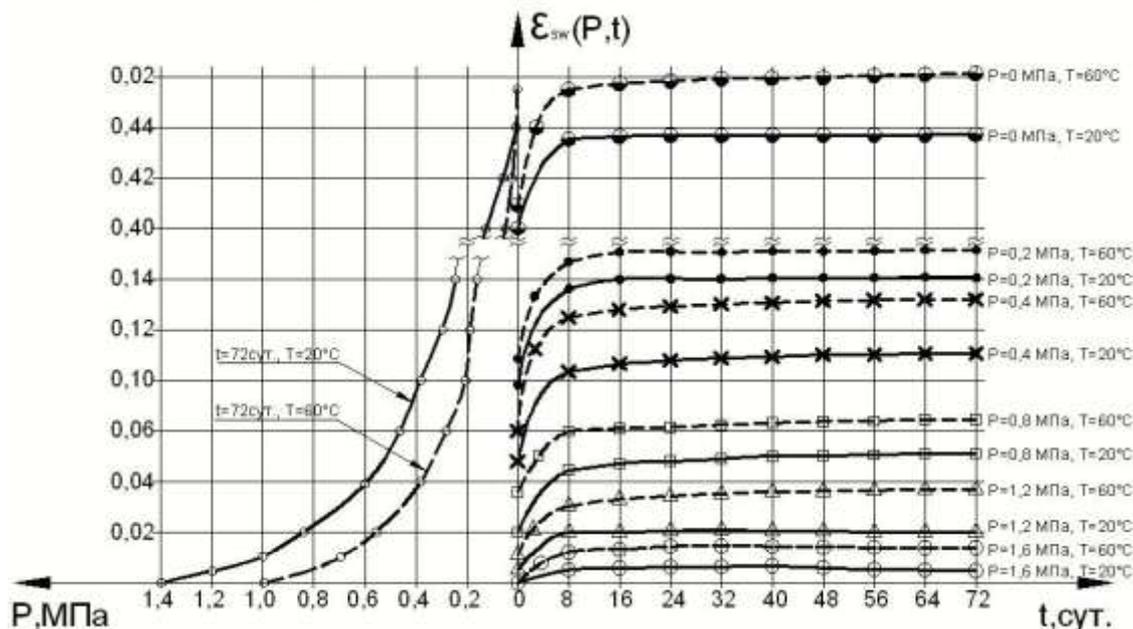


Рис. 1. Изменение относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  во времени  $t$  при различных значениях уплотняющих давлений при увлажнении водой (сплошные линии при  $T=20^{\circ}\text{C}$  и пунктирные линии при  $T=60^{\circ}\text{C}$ )

Зависимость относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от квадратного корня времени  $t$ , т.е. функции  $\psi\sqrt{t}$  приводим на рис. 2.

Из рис. 2 согласно семейству кривых ползучести законы неравновесного во времени процесса деформации набухания глины при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$  можно аппроксимировать степенной зависимостью следующего типа:

$$\psi(t) = \alpha t^{\beta}, \text{ где:} \quad (3)$$

$\alpha$  и  $\beta$  - реологические параметры глины в процессе увлажнения водой  $T=18^{\circ}\text{C}\div 20^{\circ}\text{C}$  при набухании, зависят от величины уплотняющих давлений. При увлажнении водой  $T=40^{\circ}\text{C}\div 80^{\circ}\text{C}$  и более, реологические параметры  $\alpha$  и  $\beta$  изменяется с умножением на коэффициент  $n_T$ , который зависит от величины температуры воды: при  $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $n_T=1,20$ ; при  $T=60^{\circ}\text{C}$ ,  $n_T=1,40$ ; при  $T=80^{\circ}\text{C}$ ,  $n_T=1,60$ ; при  $T=90^{\circ}\text{C}$ ,  $n_T=1,80$  и т.д. С учетом влияния температуры воды при увлажнении деформация глины в процессе набухания во времени, формула (2), имеет вид:

$$\psi(t) = (\alpha t^{\beta}) n_T. \quad (4)$$

Следует отметить, что зависимость относительного набухания глины  $\varepsilon_{sw}$  во времени во многом зависит от количества воды при увлажнении. Поэтому,

были испытаны образцы монтмориллонитовых набухающих глин при различных значениях влажности, при температуре воды  $T=20^{\circ}\text{C}$ , а также  $T=40^{\circ}\text{C}$ – $80^{\circ}\text{C}$  и более. Результаты этих исследований приведены на рис. 3, где установлена зависимость величины относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  при влажностях  $W = 12\%$  и  $18\%$  с увлажнением водой  $T=20^{\circ}\text{C}$  и  $T=60^{\circ}\text{C}$ .

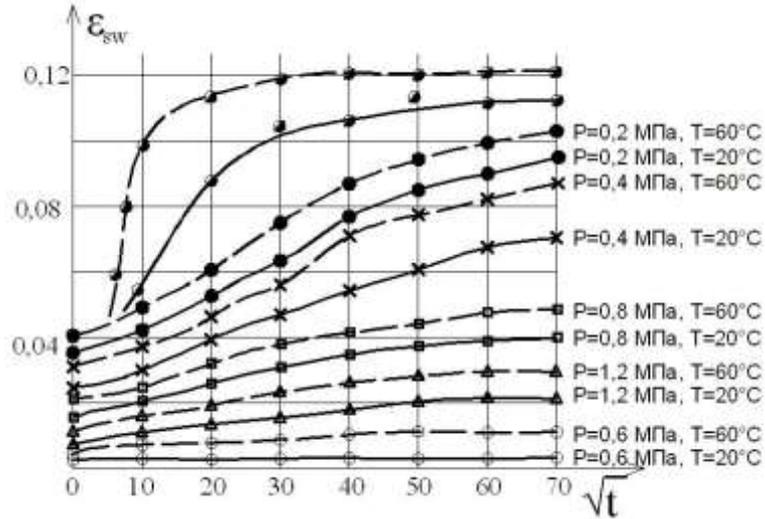


Рис. 2. Зависимость относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от квадратного корня времени  $\sqrt{t}$  (при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$  – сплошные линии,  $T=60^{\circ}\text{C}$  – пунктирные линии)

В левой части рис. 3. показана линейная зависимость относительного набухания монтмориллонитовой набухающей глины при влажности  $W = 0,12$  и  $W = 0,18$ , при  $T=20^{\circ}\text{C}$  (сплошные линии) и  $T=60^{\circ}\text{C}$  (пунктирные линии).

Как видно из рис. 3. чем больше исходная влажность глины, тем больше величина и интенсивность деформации набухания, как при увлажнении  $T=20^{\circ}\text{C}$ , так и при  $T=40^{\circ}\text{C}$ – $80^{\circ}\text{C}$  и более.

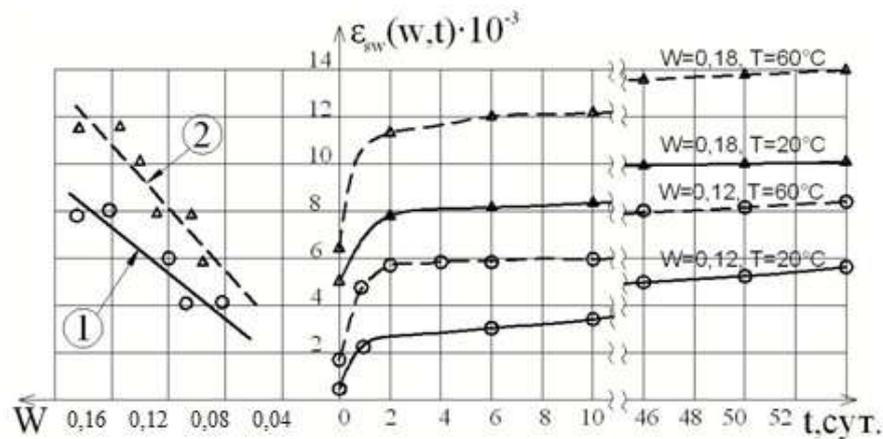


Рис. 3. Зависимость относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  во времени  $t$  при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$ (сплошные линии) и  $T=60^{\circ}\text{C}$  (пунктирные линии) при  $W = 0,12$  и  $W = 0,18$

На рис. 4 представлены кривые изменения относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от уплотняющих давлений для образцов из монтмориллонитовой глины по

приведенному составу показателей при постоянной влажности до  $W_{sat} = 38 \div 41\%$ ,  $T=20^\circ\text{C}$  (сплошные) и  $T=60^\circ\text{C}$  (пунктирные).

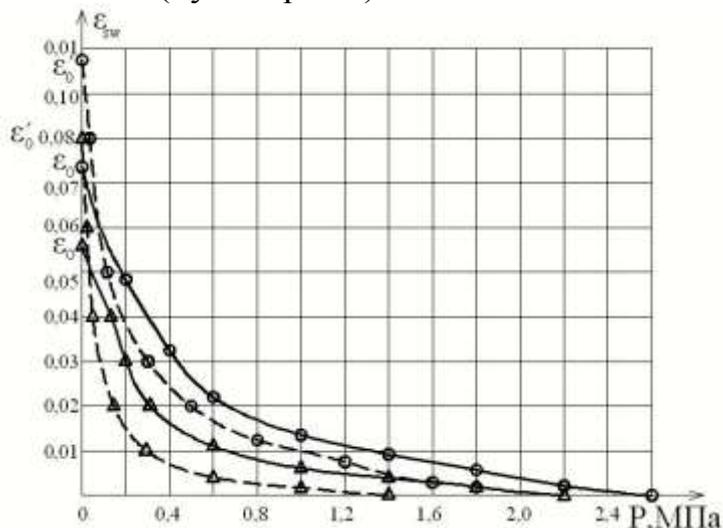


Рис. 4. Изменение относительного набухания глины от уплотняющих давлений  $P$ , МПа при влажностях  $W = 0,08$  и  $W = 0,16$ ,  $T=20^\circ\text{C}$  (сплошные линии) и  $T=60^\circ\text{C}$  (пунктирные линии) до полного водонасыщения  $W_{sat} = 0$

Как видно из рис. 4 относительное набухание  $\varepsilon_{sw}$  с увеличением уплотняющего давления  $P$ , МПа уменьшается по криволинейной зависимости при увлажнении водой  $T=20^\circ\text{C}$  и  $T=40 \div 80^\circ\text{C}$  и более. Кривые зависимости  $\varepsilon_{sw}(P)$  от оси ординат  $\varepsilon_{sw}$  начинаются с точки равной свободному набуханию  $\varepsilon_0$  и кончаются на оси абсцисс – соответствующие давлению максимальной несущей способности  $P$ , МПа, при котором относительное набухание равно нулю, т.е. порогу набухания  $P_{sw}$  (максимальное давление  $P$ , МПа).

Для математического описания полученных экспериментальных кривых на рис. 4 можно написать следующую зависимость:

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{P}{P_{sw}}\right)^{m_0}, \text{ где:} \quad (5)$$

$\varepsilon_0$  - начальная величина  $\varepsilon_{sw}$ , при  $P=0$  для данной влажности и увлажнении водой  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon'_0$ , при увлажнении водой  $T=60^\circ\text{C}$ . Значения параметра  $m_0$  для исследованных набухающих монтмориллонитовых глин определяются опытами, в наших опытах они имеют значения  $m_0 = 2,5 \div 2,8$  при увлажнении водой  $T=20^\circ\text{C}$ , а при  $T=60^\circ\text{C}$   $m_0 = 2,9 \div 3,4$ .

Как видно из рис. 4, криволинейная зависимость  $\varepsilon_{sw} = f(P)$  в небольшом диапазоне изменения уплотняющих давлений ( $0 \div 0,4$  МПа) имеет существенное значение, а затем, при увеличении давлений  $P > 0,4$  МПа эта криволинейность приближается к прямой, тогда величина  $m_0 = 1$ , т.е.:

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon_0 \left(1 - \frac{P}{P_{sw}}\right). \quad (6)$$

На рис. 5 приведены зависимости набухания образцов монтмориллонитовых глин во времени при различных значениях уплотняющей нагрузки, которые построены на логарифмической сетке координат.

Как видно из рис. 5, все кривые семейства  $\varepsilon_{sw} = f(t)$  на логарифмической сетке координат выпрямляются и становятся параллельными. Поэтому они могут быть получены из одной кривой этого семейства умножением ее ординаты на некоторую величину, являющуюся функцией уплотняющей нагрузки, т.е. можно выразить в следующем виде, для воды  $T=20^\circ\text{C}$ :

$$\varepsilon_{sw} = \alpha(P)t^\beta, \text{ где:} \quad (7)$$

$\alpha$  и  $\beta$  - реологические параметры глинистого грунта, характеризующие физическую особенность процесса набухания.

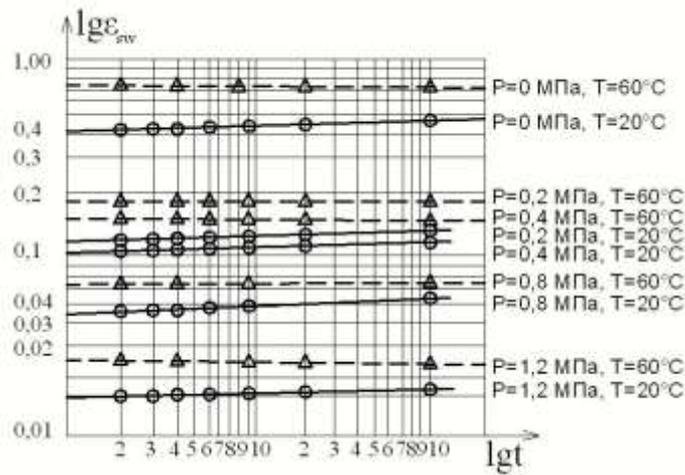


Рис. 5. Зависимость набухания глины во времени при различных уплотняющих давлениях  $P$  и температурах  $T$  при увлажнении (сплошные линии при  $T=20^\circ\text{C}$  и пунктирные при  $T=60^\circ\text{C}$ ) в логарифмических координатах.

При увлажнении горячей водой формула (5) умножается на коэффициент  $n_T$ , т.е.:

$$\varepsilon_{sw} = [\alpha(P)t^\beta] \cdot n_T, \text{ где:} \quad (8)$$

$n_T$  - коэффициент, учитывающий влияние температуры воды при увлажнении глины, приведенный выше.

Параметры зависимостей (7) и (8) определяются непосредственно из графика  $\lg \varepsilon_{sw}(\lg t)$  (рис. 5) соответственно отрезкам, отсекаемым прямой на оси ординат и тангенсом угла наклона этой прямой к оси абсцисс.

На рис. 6 представлены кривые изменения напряжений при некоторых постоянных значениях относительного набухания  $\varepsilon_{sw} = const$ .

Как видно из рис. 6, в процессе набухания поддержание некоторой постоянной деформации происходит вследствие увеличения во времени напряжений (давлений)  $P$ . Причем, существенное возрастание напряжения при увлажнении водой  $T=20^\circ\text{C}$  и  $T=40^\circ\text{C} \div 80^\circ\text{C}$  и более, происходит в первой, неустановившейся стадии набухания.

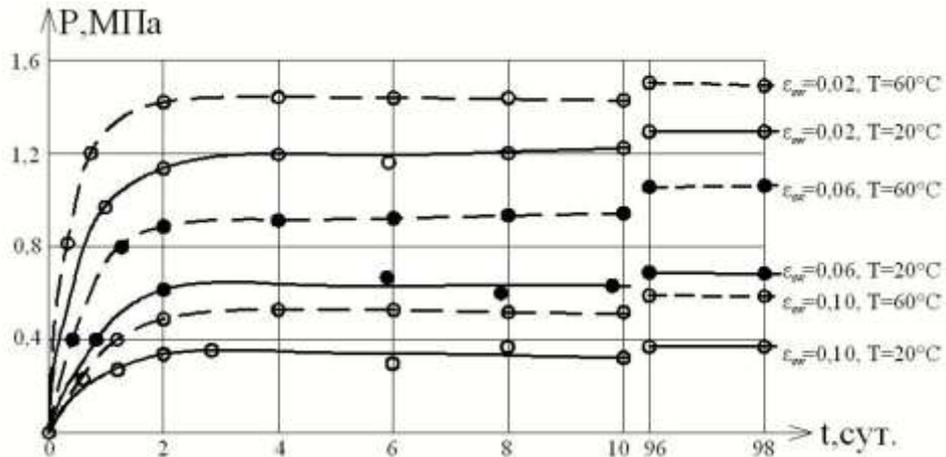


Рис. 6. Изменение напряжений во времени при постоянных значениях относительного набухания при увлажнении водой  $T=20^{\circ}\text{C}$  (сплошные линии) и  $T=60^{\circ}\text{C}$  (пунктирные линии)

Набухание  $\varepsilon_{sw}$  при увлажнении водой  $T=40^{\circ}\text{C}\div 80^{\circ}\text{C}$  и более, значительно больше, чем при увлажнении водой  $T=18^{\circ}\text{C}\div 20^{\circ}\text{C}$ .

Применяем теорию старения для описания конечной абсолютной деформации набухания, как при увлажнении водой  $T=18^{\circ}\text{C}\div 20^{\circ}\text{C}$ , так и при увлажнении водой высокой температуры  $T=40^{\circ}\text{C}\div 80^{\circ}\text{C}$  и более. При этом, внешнюю нагрузку принимаем постоянной, а распределение напряжений в основаниях сооружений неизменным во времени  $t$ , тогда конечная абсолютная деформация набухания  $\varepsilon_{sw}^{con}$  в основаниях сооружений будет иметь вид:

$$\varepsilon_{sw}^{con} = \int_0^{H_H} \varepsilon_0 \left(1 - \frac{P(z)}{P_{sw}}\right)^{m_0} dz, \text{ где:} \quad (9)$$

$\varepsilon_0$ ,  $m_0$ ,  $P_{sw}$  - параметры, приведенные выше;  $P(z)$  - вертикальное давление (напряжение) под подошвой фундамента по глубине  $z$ . Верхний предел  $H_H$  представляет собой расчетную границу зоны набухания (т.е. расстояние от подошвы фундамента до нижней границы набухания).

### Выводы

Набухающие монтмориллонитовые или бентонитовые глины при увлажнении водой дают деформации набухания, увеличивают начальный объем почти в два раза. При набухании механические свойства этих грунтов резко ухудшаются, изменяются прочностные параметры: - угол внутреннего трения  $\varphi$  уменьшается в 3÷5 раз, а сила сцепления  $c$  в 12÷16 раз, модуль общей деформации  $E_0$  уменьшается от 40 МПа до 5 МПа и менее, сила набухания достигает  $1500 \text{ кН/м}^2 = 1,5 \text{ МПа}$ , что значительно превосходит обычные давления от фундаментов на основания (примерно, в 4÷5 раз). Поэтому, допускать развитие сил набухания под подошвой любого сооружения недопустимо.

Деформация набухания при увлажнении горячей водой  $T=40\div 80^{\circ}\text{C}$  и более протекает значительно быстрее, чем при увлажнении водой при  $T=18\div 20^{\circ}\text{C}$ , а также имеет большие величины относительных и абсолютных деформаций.

Для описания закономерностей деформации набухания при увлажнении водой во времени  $t$  подходит теория ползучести предложенная Ю.Н. Работновым.

### Список использованных источников

1. Мустафиев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. М.: Изд. «Высшая школа», 1989. – 590с.
2. Сорочан Е.А. Строительство сооружений на набухающих грунтах. – М.: Стройиздат, 1974. – 225с.
3. Злочевская Р.И. и др. Исследование взаимодействия глин с кислыми и щелочными растворами в процессе их набухания./Р.И. Злочевская, В.И. Дивисилова, Г.А. Куприна, Е.М. Сергеев.// - В кн.: Связанная вода в дисперсных системах. М.: 1974, вып. 3. – с.4÷20.
4. Цытович Н.А. Основания и фундаменты. М.: «Высшая школа», 1970. – 382с.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций, М.: Наука, 1968. – 752с.
6. Ржаницын А.Р. Теория ползучести, М.: Стройиздат, 1968. – 46с.

*Статья поступила в редакцию 06.03.2015 г.*

УДК 622.02

**Н. В. Зуєвська**, д.т.н., проф., **М. І. Ванчак** асп., **М. В. Туровський** студ. (НТУУ «КПІ»)

### **ОЦІНКА ДЕФОРМАЦІЙ ПІДЗЕМНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ПІД ВПЛИВОМ ВИБУХОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**N. Zuievskya, M. Vanchak, M. Turovskiy** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

### **EVALUATION OF UNDERGROUND STRUCTURE DEFORMATIONS CAUSED BY BLASTING LOAD**

*У статті описано вплив підземного вибуху на металеву конструкцію, що знаходиться в ґрунтовому масиві з використанням програми LS – DYNA. Враховуючи властивості ґрунту і взаємодію ґрунт – конструкція, розглянуто поширення вибухової хвилі у ґрунтовому масиві та представлені зони напружень і горизонтальні деформації металевої конструкції. В роботі показана залежність деформацій підземної конструкції від відстані до джерела вибуху. Результати цього дослідження дають інформацію про вплив підземного*