

УДК 624.131.22

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-192-199

*Ю.П. СМОЛИН, К.В. ВОСТРИКОВ,  
Сибирский государственный университет путей сообщения*

## **УПЛОТНЕНИЕ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ С УЧЕТОМ СЖИМАЕМОЙ ПОРОВОЙ ЖИДКОСТИ И ПОЛЗУЧЕСТИ ГРУНТА**

Решается задача консолидации глинистого грунта при шаровом и девиаторном давлении с учетом сжимаемости поровой жидкости и ползучести скелета грунта. При решении задачи найдено дифференциальное уравнение уплотнения связного грунта, заполненного линейно-сжимаемой грунтовой водой. Учитывалось, что объем газа в грунтовой воде не превышает 10 %. Решение дифференциального уравнения производилось методом Фурье.

Для численного учета меры ползучести при уплотнении консолидирующегося грунта под нагрузкой была использована простая в исполнении методика – испытание в компрессионном приборе образцов грунта из одного и того же монолита, но с несколькими различными высотами. Зная в любой момент времени относительную вертикальную деформацию этих образцов, можно с помощью аппроксимации и экстраполяции найти относительную деформацию при высоте образца, стремящегося к нулю. При практически нулевой толщине образца деформация будет зависеть только от ползучести скелета грунта, а поровое давление уже не будет играть роли.

Полученные значения относительной деформации использованы для подбора функции ядра ползучести. Авторы установили, что экспоненциальная функция оптимально описывает процесс уплотнения грунта на всем участке: от начала уплотнения и до его окончания.

Зная выражение для напора, можно найти напряжение в скелете грунта. В результате была найдена величина осадки грунта при трехосном сжатии с учетом мгновенного его деформирования.

**Ключевые слова:** газы в поровой воде; гидростатическое давление; функция меры ползучести скелета грунта; осадка грунта при чистом сдвиге; коэффициент объемной сжимаемости грунта; компрессионный прибор.

**Для цитирования:** Смолин Ю.П., Востриков К.В. Уплотнение водонасыщенных грунтов с учетом сжимаемой поровой жидкости и ползучести грунта // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 5. С. 192–199

DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-192-199

*Yu.P. SMOLIN, K.V. VOSTRIKOV,  
Siberian State Transport University*

## **COMPACTION OF SATURATED SOILS WITH REGARD TO COMPRESSIBLE PORE FLUID AND SOIL CREEP**

The paper describes the problem of consolidation of clay soil with spherical tensor and stress deviator, taking into account compressibility of pore fluid and the soil creep. In solving the problem, the differential equation is suggested for compacting cohesive soil filled with linearly compressible groundwater. It is considered that the gas volume in the groundwater does not exceed 10 %. The solution of the differential equation is based on the Fourier transform.

For the numerical calculation of creep during compaction of consolidated soil an easy-to-use method was used, i.e. testing of soil samples of the same monolith in the compression device, but different height. Knowing the relative vertical deformation of these samples, approximation and extrapolation methods allow to find the relative deformation at the sample height tending to zero. At almost zero sample thickness, deformation depends only on the soil creep, while the pore pressure will no longer play a role.

The obtained values of the relative strain are used to select the function of the creep nucleus. It is found that the exponential function optimally describes the process of soil compaction over the entire area: from the beginning of compaction to its termination.

Knowing the pressure, the stress in soil and the amount of sediment are found with a triaxial compression, taking into account its instantaneous deformation.

**Keywords:** pore water; hydrostatic pressure; soil skeleton; soil sediment; uniaxial shear; compressibility coefficient; consolidometer.

**For citation:** Smolin Yu.P., Vostrikov K.V. Uplotnenie vodonasyshchennykh gruntov s uchetom szhimaemoi porovoi zhidkosti i polzuchesti grunta [Compaction of saturated soils with regard to compressible pore fluid and soil creep]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2019. V. 21. No. 5. Pp. 192–199. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-5-192-199

Известно, что всякий водонасыщенный грунт в строгом смысле не является двухкомпонентным, т. к. в любой грунтовой воде обычно имеется хотя бы самое небольшое количество пузырьков воздуха. Газы могут появляться в поровой воде вследствие биохимических процессов в грунтах и различных химических реакций взаимодействия скелета грунта и поровой воды. Газ в порах находится в свободном и защемленном виде. Если газы в порах занимают большую часть объема пор и сообщаются с атмосферой, а вода расположена только в местах контакта частиц, то считается, что газ находится в свободном состоянии. В этом случае деформации грунта обусловлены только деформацией скелета, а фильтрационные явления отсутствуют. И наоборот, если газы в порах грунта занимают небольшую часть объема пор, а вода гидравлически непрерывна и не связана со скелетом грунта, то считается, что газы находятся в защемленном состоянии. Тогда деформация грунта будет обусловлена как характером сжатия этих пузырьков воздуха, так и фильтрационными явлениями.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования, содержащиеся в порах грунта защемленные пузырьки воздуха могут оказать существенное влияние на его напряженно-деформированное состояние [1–3]. При содержании пузырьков воздуха в воде деформируемость грунтовой массы увеличивается в сотни раз.

В опытах П.Ф. Мельникова приводятся данные о том, что в глинистых грунтах при влажности до 25–30 % объем защемленных газов составляет 5–6 % от объема образца или до 12–16 % от объема пор.

Решение настоящей задачи выполнялось из предположения, что объем количества газа в грунтовой воде не превосходит 10 %.

Для одномерного уплотнения водонасыщенного грунта проф. В.А. Флориним [4] было получено дифференциальное уравнение изменения коэффициента пористости  $e$  во времени  $t$  с учетом влияния защемленного воздуха

$$\frac{\partial e}{\partial t} = (1 + e_{\text{cp}}) \left( k_f \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - k_0 \frac{\partial H}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где  $k_f$  – коэффициент фильтрации, см/с;  $H$  – напор в поровой воде, см;  $k_0$  – коэффициент объемной сжимаемости, см<sup>2</sup>/кг;  $z$  – координата рассматриваемой точки, см;  $e_{\text{cp}}$  – среднее значение коэффициента пористости грунта.

Зависимость между напряжениями в скелете грунта и коэффициентом пористости принимается

$$e = -m_0 p + A, \quad (2)$$

где  $m_0$  – коэффициент сжимаемости, 1/кПа;  $A$  – произвольная постоянная компрессионной кривой;  $e$  – значение коэффициента пористости грунта.

Уравнение равновесия в рассматриваемом случае имеет вид

$$p = p_z + u, \quad (3)$$

где  $p$  – внешняя нагрузка (полное давление, прикладываемое на образец), кПа;  $p_z$  – давление в скелете грунта; кПа;  $u$  – то же в поровой воде, кПа.

При единичном всестороннем давлении уравнение изменения коэффициента пористости во времени будет иметь вид [5]

$$\frac{\partial e}{\partial t} = 3(1 + e_{\text{cp}}) \left( k_f \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - k_0 \frac{\partial H}{\partial t} \right). \quad (4)$$

Уплотнение водонасыщенной грунтовой среды будет зависеть от линейно сжимающей жидкости во время фильтрационной консолидации и ползучести скелета грунта. В этой связи возникает проблема выделения процесса ползучести во время фильтрационной консолидации из общего процесса деформирования грунта.

Для выделения деформации ползучести скелета грунта во время консолидации авторы применили методику, заключающуюся в испытании в компрессионном приборе нескольких образцов грунта с различной высотой, отобранных из одного монолита. По результатам экспериментов строились графики изменения относительной вертикальной деформации образцов во времени. Затем для этих графиков путем экстраполяции определялась относительная деформация при толщине образца в 1 мм. При такой толщине образца фильтрационной консолидацией уже можно пренебречь – то есть деформация будет протекать только за счет ползучести скелета.

Для опытов использовалась паста суглинка (физические характеристики представлены в таблице).

При проведении экспериментальных исследований к образцам грунта прикладывалось уплотняющее давление 100 кПа.

Результаты компрессионных испытаний образцов грунта высотой 25, 19, 14 и 9 мм представлены на рис. 1, а. Результаты экстраполяции изменения относительной деформации грунта во времени при высоте образца 1 мм показаны на рис. 1, б.

Для аппроксимации кривой ползучести подбирались математическая функция, которая оптимально описывает построенный график на всем участке: от начала уплотнения до его окончания. Авторы опробовали ряд функций

ядра ползучести, и оказалась, что экспоненциальная функция наиболее оптимально описывает опытную кривую [6]

$$\varepsilon(t) = a_0 + a_1 \cdot [1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)}], \quad (5)$$

где  $\tau$  – момент приложения нагрузки (принимается, что нагрузка к грунту прикладывается мгновенно, поэтому следует принять обычное условие, что эпюра напоров в начальный момент времени  $t = \tau = 0$ );  $a_0$  – коэффициент мгновенного деформирования грунта при мгновенном приложении нагрузки;  $a_1, \gamma_1$  – коэффициенты вязкого уплотнения (ползучести скелета грунта).

### Показатели физических свойств испытуемого образца грунта

Удельный вес частиц грунта, кН/м <sup>3</sup>	Удельный вес грунта, кН/м <sup>3</sup>	Удельный вес сухого грунта, кН/м <sup>3</sup>	Пористость, %	Коэффициент пористости	Влажность, д.е.	Коэффициент водонасыщения	Влажность на границе текучести, д.е.	Влажность на границе раскатывания, д.е.	Число пластичности, %	Показатель текучести
$\gamma_s$	$\gamma$	$\gamma_d$	$n$	$e$	$W$	$S_r$	$W_L$	$W_P$	$I_P$	$I_L$
27,0	19,3	14,8	45	0,819	0,30	0,99	0,31	0,21	10	0,90

Отыскание значений параметров  $a_1$  и  $\gamma_1$  производится путем итерационного решения уравнения (5).

Основное дифференциальное уравнение уплотнения водонасыщенного грунта с учетом линейной сжимаемости поровой жидкости, линейной ползучести скелета грунта при принятой функции для меры ползучести при всестороннем равномерном сжатии было получено в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} &= \gamma_1(a_0 + a_1) \frac{\partial H}{\partial t} + a_0 \gamma \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = \\ &= 3 \left[ k_f \left( \frac{\partial^3 H}{\partial z^2 \partial t} + \gamma_1 \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \right) - k_0 \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \gamma_1 \frac{\partial H}{\partial t} \right) \right], \quad (6) \end{aligned}$$

где  $\gamma$  – удельный вес грунта, г/см<sup>3</sup>.

Решение уравнения (6) производилось методом Фурье с учетом сжимаемой поровой жидкости.

Выражение для напора  $H$  будет равно

$$\begin{aligned} H &= \frac{4p}{\gamma\pi} \sum_{1,3,5...}^{\infty} \frac{1}{i} \left\{ \frac{A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}} e^{\beta_i t} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}} e^{\beta_i t} \right\} \sin \frac{i\pi z}{h}, \quad (7) \end{aligned}$$

где  $p$  – внешняя одноразовая нагрузка, кПа.

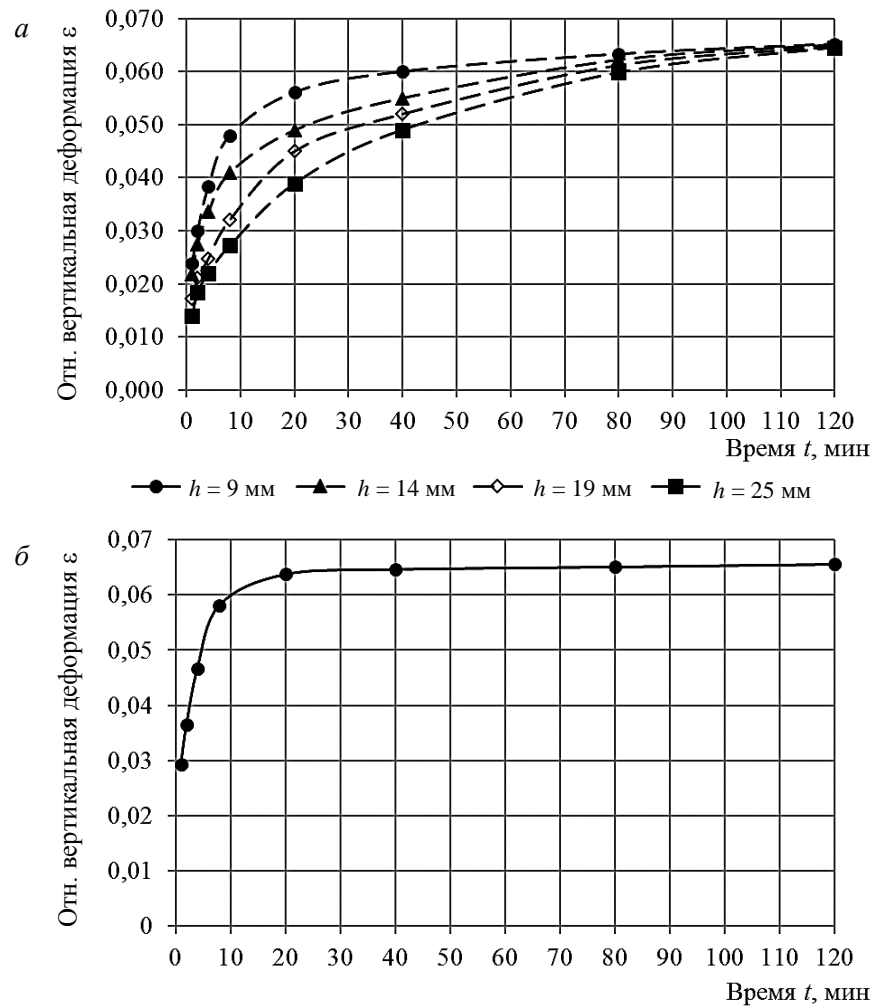


Рис. 1. Изменение относительной деформации образца грунта во времени при компрессионных испытаниях (вертикальное давление 100 кПа):  
 а – реальные экспериментальные данные для образцов грунта высотой 25, 19, 14 и 9 мм; б – результаты экстраполяции экспериментальных данных для высоты образца  $h = 1$  мм

Расшифровка остальных параметров, входящих в формулу (7), представлена ниже:

$$C_i = \frac{A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}}, \quad (8)$$

$$D_i = \frac{A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}}, \quad (9)$$

$$\beta_i' = -A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i}, \quad (10)$$

$$\beta_i'' = A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i}, \quad (11)$$

$$A_i = \frac{1}{2} \frac{\gamma_1 [\gamma(a_0 + a_1) + 3k_0] + 3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0)\gamma}, \quad (12)$$

$$B_i = \frac{3k_f \alpha_i^2 \gamma_1}{(a_0 + 3k_0)\gamma}, \quad (13)$$

$$\alpha_i = \frac{i\pi}{h}. \quad (14)$$

$C_i$  и  $D_i$  являются сложными функциями от параметров грунта, учитывающих мгновенную деформацию, ползучесть скелета, объемную сжимаемость поровой жидкости, коэффициент фильтрации.

Зная выражение для напора, находим напряжение в скелете грунта:

$$p_z = p - \gamma H, \quad (15)$$

$$p_z = p \left( 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i} \left\{ \frac{A_i + \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma} e^{\beta_i' t}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}} - \frac{A_i - \sqrt{A_i^2 - B_i} - \frac{3k_f \alpha_i^2}{(a_0 + 3k_0 a_1 \gamma_1) \gamma} e^{\beta_i'' t}}{2\sqrt{A_i^2 - B_i}} \right\} \sin \frac{i\pi z}{h} \right). \quad (16)$$

Так как касательные напряжения при чистом сдвиге воспринимаются только скелетом грунта, то объемные деформации равны нулю, при этом происходит только формоизменение образца. Соотношение боковых и осевых напряжений при чистом сдвиге для изотропного грунта будет равно

$$\sigma_{бок} = -\frac{1}{2} \sigma_{ос}. \quad (17)$$

Если принять, что соотношение боковых и осевых деформаций зависит только от упругих характеристик, то чистый сдвиг будет иметь место в течение всего процесса консолидации. При постоянном соотношении давлений  $\sigma_{бок}$  и  $\sigma_{ос}$  поровое давление  $u$  должно быть равно нулю.

Зная выражение для напора, находим напряжение в скелете грунта и объемную деформацию. Вертикальная осадка при гидростатическом давлении в любой период времени будет равна

$$s_1(t) = \frac{ph}{3} \left( a_0 - a_1 \gamma_1 \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^2} (C_i e^{\beta_i' t} - D_i e^{\beta_i'' t}) \right] e^{-\gamma_1 t} \right). \quad (18)$$

А так как при чистом сдвиге газированная вода не влияет на процесс деформирования, то продольную осадку грунтового образца при чистом сдвиге можно записать в виде

$$s_2(t) = ph \left( a_0 + a_1 \left[ 1 - e^{-\gamma t} \right] \right). \quad (19)$$

Складываем осадки при гидростатическом давлении  $S_1(t)$  и чистом сдвиге  $S_2(t)$ , будем иметь общую осадку при воздействии внешней нагрузки с учетом сжимаемой поровой жидкости и ползучести грунта

$$\begin{aligned} s_{\text{общ}}(t) &= s_1(t) + s_2(t) = \\ &= \frac{ph}{3} \left( a_0 - a\gamma_1 \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1,3,5}^{\infty} (C_i e^{\beta_i} - D_i e^{\beta_i}) e^{-\gamma t} \right] \right) + \\ &+ ph \left( a_0 + a_1 \left[ 1 - e^{-\gamma t} \right] \right). \end{aligned} \quad (20)$$

В решении принято, что коэффициент сжимаемости грунта  $m_0 \geq 0,1$  (1/кПа). При значениях  $m_0 < 0,1$  (1/кПа) учет сжимаемости поровой воды не будет иметь существенного значения, т. к. уплотнение будет происходить в основном за счет резкого изменения структуры грунта и скачкообразного изменения пористости. К таким грунтам можно отнести структурно-неустойчивые грунты: слабосцементированные илистые грунты, заторфованные грунты, ленточные глины, лессовидные грунты и др.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Грунтоведение* / под ред. Е.М. Сергеева. Москва : МГУ, 1983. 392 с.
2. *Цытович Н.А.* Механика грунтов (краткий курс). Москва : Высшая школа, 1979. 268 с.
3. *Зарецкий Ю.К.* Теория консолидации грунтов. Ленинград : Наука, 1967. 268 с.
4. *Флорин В.А.* Основы механики грунтов. Т. 2. Москва ; Ленинград : Стройиздат, 1961. 543 с.
5. *Востриков К.В., Смолин Ю.П., Клименок А.В.* К методике разделения фильтрационной консолидации и ползучести скелета водонасыщенных грунтов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения (СГУПС). 2018. № 3. С. 70–76.
6. *Смолин Ю.П., Востриков К.В.* Ползучесть анизотропного грунта при чистом сдвиге // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 5 (64). 2017. С. 200–208.

#### REFERENCES

1. *Sergeyeva E.M., Ed.* Gruntovedenie [Soil science]. Moscow: MSU, 1983. 392 p. (rus)
2. *Tsytovich N.A.* Mekhanika gruntov [Soil mechanics (short course)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 268 p. (rus)
3. *Zaretsky Yu.K.* Teoriya konsolidatsii gruntov [Theory of soil consolidation]. Leningrad: Nauka, 1967. 268 p. (rus)
4. *Florin V.A.* Osnovy mekhaniki gruntov [Fundamentals of soil mechanics], vol. 2. Moscow, Leningrad: Stroyizdat, 1961. 543 p. (rus)
5. *Vostrikov K.V., Smolin Yu.P., Klimenok A.V.* K metodike razdeleniya fil'tratsionnoi konsolidatsii i polzuchesti skeleta vodonasyshchennykh gruntov [Separation of filtration consolidation and creep of saturated soil skeleton]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2018. V. 3. Pp. 70–76. (rus)
6. *Smolin Yu.P., Vostrikov K.V.* Polzuchest' anizotropnogo grunta pri chistom sdvige [Anisotropic soil creep at pure shear]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2017. No. 5 (64). Pp. 200–208. (rus)

**Сведения об авторах**

*Смолин Юрий Петрович*, докт. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, yurij.smolin@bk.ru

*Востриков Константин Владимирович*, канд. техн. наук, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, kostas\_v@mail.ru

**Authors Details**

*Yury P. Smolin*, DSc, A/Professor, Siberian State Transport University, 191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, yurij.smolin@bk.ru

*Konstantin V. Vostrikov*, PhD, Siberian State Transport University, 191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, kostas\_v@mail.ru