УДК 624.131.5

ОПИСАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПРОЦЕССА КОНСОЛИДАЦИИ ШЕЛЬФОВЫХ ГРУНТОВ КОМБИНИРОВАННЫМИ РЕОЛОГИЧЕСКИМИ МОДЕЛЯМИ

А. М. Самедов, докт. техн. наук (НТУУ «КПИ»), Л. Ф. Асланов, канд. техн. наук (АзАСУ, г. Баку)

Розглянуто стан шельфових ґрунтів як пружнов'язкого середовища і запропоновано реологічну модель, що характеризує нелінійні властивості при консолідації від зовнішніх навантажень. Розв'язано рівняння кульового і девіаторного тензорів напружень і деформацій для реологічної комбінованої моделі.

Ключові слова: шельфові ґрунти, тензори напружень і деформацій, кульові і девіаторні тензори, консолідація, пружне, в'язке середовище, зсув, повзучість, швидкість.

Рассмотрено состояние шельфовых грунтов как упруговязкой среды и предложена реологическая модель, характеризующая нелинейные свойства при консолидации от внешних нагрузок. Решены уравнения шарового и девиаторного тензоров напряжений и деформаций для реологической комбинированной модели.

Ключевые слова: шельфовые грунты, тензоры напряжений и деформаций, шаровые и девиаторные тензоры, консолидация, упругая, вязкая среда, сдвиг, ползучесть, скорость.

The state of offshore soils as a viscoelastic medium is examined and the rheological model describing the nonlinear properties during the consolidation due to external loads is proposed. The equations of spherical and deviatoric stress and strain tensors for a rheological combined model are formulated and solved.

Keywords: offshore soils, stress and strain tensors, spherical and deviatoric tensors, consolidation, elastic, viscous medium, shear, creep, speed.

Актуальность темы. В инженерной практике часто встречаются случаи, когда при проектировании и строительстве морских сооружений не применяются реологические модели шельфовых грунтов. Поэтому разработка реологических моделей для описания процессов консолидации шельфовых грунтов является очень актуальной проблемой. В литературных источниках [1–11] реологические модели, способные описывать состояние процесса консолидации шельфовых грунтов, отсутствуют.

Цель исследования – создать реологическую модель для описания процесса консолидации шельфовых грунтов в виде линейных и нелинейных тензоров напряжений и деформаций.

Изложение основного материала. В компрессионном приборе (одометре) были испытаны серии образцов шельфовых грунтов (суглинков), взятых из глубины 8,8 м из-под песчаного слоя толщиной 1,6 м и морской воды глубиной 3,4 м. Суглинки имели следующие показатели: удельный вес частицы γ_s = 27,8 кН/м^3; удельный вес γ = 18,7 кН/м^3; природная влажность W = 0,18; удельный вес скелета (после сушки при t = 110°) $\gamma_{ск} = \gamma_d$ = 15,2 кН/м^3; коэффициент пористости $e = \frac{\gamma_w}{\gamma}(1+W) - 1 = 0{,}754$; степень влажности

$S_r = \dfrac{\gamma_s W}{\gamma_w e} = 0{,}664 < 0{,}8$ – влажный; предел текучести W_L = 0,218; предел раскатывания W_P = 0,126; предел пластичности $I_p = W_L - W_P$ = 0,218 – 0,126 = 0,092; 0,07 < I_P = 0,092 < 0,17 – грунт суглинок; число консистенции $I_l = \dfrac{W - W_p}{W_L - W_p} = 0{,}587$; $0{,}5 < I_l = 0{,}587 < 0{,}75$ – суглинок мягкопластичный.

Рассмотрим шельфовые грунты как нелинейную упруговязкую среду. При упруговязкой среде соотношение между шаровыми и девиаторными компонентами тензоров напряжений и деформаций в основном базируются на I-й половине комбинируемой модели, предложенной нами (рис. 1), то есть I – тела Кельвина, для которого модуль всестороннего сжатия K и модуль сдвига G рассматриваются как нелинейные функции напряженного состояния тела, применительно для шельфовых грунтов.

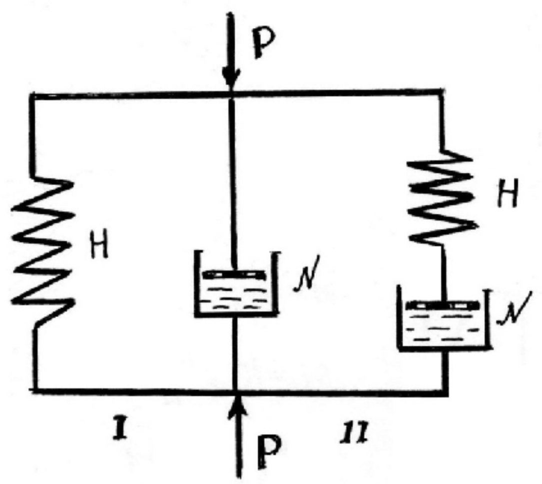

Рис. 1. Комбинированная реологическая модель для консолидации шельфовых грунтов: I – тело Кельвина; II – тело Максвелла

Основные нелинейные уравнения имеют следующий вид:

а) для девиаторной части тензора напряжений и деформаций:

$$\tau_{oct} = G\gamma_{oct} + \nu^d \gamma_{oct}; \; G = \frac{\bar{G}\psi}{\psi + G\gamma_{oct}}(H + G_{oct}); \tag{1}$$

б) для шаровой части тензора напряжений и деформаций:

$$G_{oct} = K\varepsilon_\nu + \nu^\circ \dot{\varepsilon}; \; K = \frac{\alpha(\varepsilon_0 + \varepsilon_\nu)^\beta - \sigma_0}{\varepsilon_\nu}. \tag{2}$$

Здесь ν^d – девиаторная вязкость; $\psi = \dfrac{\dfrac{\partial \nu^d}{\partial t}}{1 + \dfrac{\partial \nu^d}{G \cdot \partial t}}$ – параметр Лямэ; γ_{oct} – октаэдрическая сдвиговая деформация; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; ε_v – объемная деформация, соответствующая октаэдрическому напряжению σ_{oct}; ε_0 – объемная деформация, соответствующая напряжению σ_0; ν° и ν^d – соответственно коэффициенты шаровой и девиаторной вязкости; H, G_{oct} – постоянные гидростатического давления, характеризующие эффект сцепления в грунте; $\overline{G}$ – начальный модуль сдвига; α – сжимаемость, которая принимается линейной; β – постоянная, которая характеризует нелинейность зависимости между напряжением и деформацией; τ_{oct} – сдвиговое октаэдрическое (касательное) напряжение.

Если образцы из шельфовых грунтов испытывать в стабилометре, то зависимость между осевым эффективным напряжением и деформацией можно выразить исходя из комбинированной реологической модели, I-я часть которой характеризует модель тела Кельвина с нелинейной вязкостью. В уравнении для одномерной консолидации I-я часть нашей комбинированной модели (часть тела Кельвина) будет иметь вид

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{k_ф(1+e)}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}\right] = \frac{\partial e}{\partial t} \ . \tag{3}$$

В формуле (3) $k_ф$ и $(1+e)$, то есть коэффициент фильтрации и коэффициент пористости при незначительном увеличении давления P принимаются постоянными. Коэффициент сжимаемости m_0 скелета грунта также принимается постоянным, то есть $k_ф = \text{const}$; $(1+e) = \text{const}$; $m_0 = \text{const}$.

В таких случаях формула (3) упрощается:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial e}{\partial t}, \tag{4}$$

где $c_v = \dfrac{k_ф(1+e)}{\gamma_w} = \text{const}$ – коэффициент.

Рассмотрим отрезок компрессионной кривой консолидированного шельфового грунта (рис. 2) на основе предложенной комбинированной реологической модели.

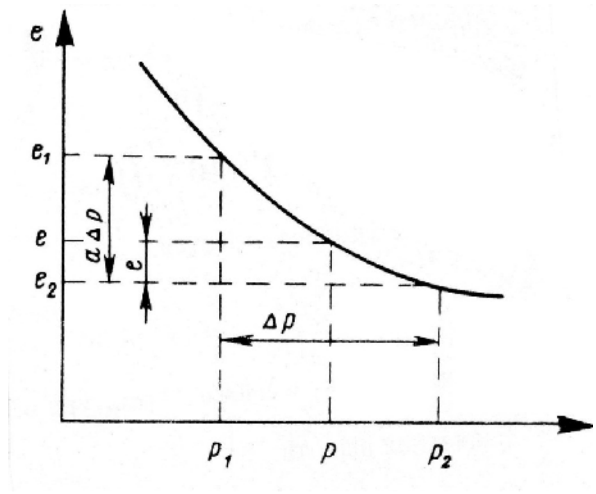

Рис. 2. Отрезок компрессионной кривой для шельфового грунта на основе комбинированной реологической модели

Из рис. 2. видно, что $\frac{e_1 - e_2}{\alpha} = \frac{e_1 - e}{\alpha} + \tau + u$, тогда

$$\frac{e - e_2}{\alpha} = \tau + u, \tag{5}$$

где τ – вязкое сопротивление структурного скелета шельфового грунта; *u* – избыточное поровое давление.

Нелинейность вязкого сопротивления в основном шельфовых глинистых грунтов выражается по закону Оствальда в следующей форме:

$$\tau = -\nu\left(\frac{\partial e^{1/n}}{\partial t}\right), \tag{6}$$

где *n* – коэффициент нелинейности, принимается $n > 1$, а ν имеет постоянную величину при увеличении давления.

Выражение (6) может быть переписано в следующем виде:

$$e - e_2 = \alpha\left[u - \nu\left(\frac{\partial e^{1/n}}{\partial t}\right)\right]. \tag{7}$$

Размерность коэффициента вязкости ν зависит от величины *n*. Равенство $\nu = 0$ приводит к зависимости изменения коэффициента пористости *e* в классической теории консолидации, предложенной К. Терцаги в следующем виде:

$$de = \alpha du. \tag{8}$$

Уравнения (4) и (7) решаются при обычных граничных условиях одномерной консолидации. Решение получается в безразмерной форме с использованием следующих подстановок:

а) $e' = e - e_2$ и $\frac{\partial e'}{\partial t} = \frac{\partial e}{\partial t}$;

б) $x = z/H$, где H – длина пути фильтрации при сжатии;

в) $u' = u/\Delta P = P_2 - P_1$ – увеличение давления (см. рис. 2);

г) $(e_1 - e)/(e_1 - e_2) = \psi$ – степень консолидации шельфовых грунтов;

д) $\lambda = 1 - \psi = \dfrac{e - e_1}{e_1 - e_2} = \dfrac{e'}{\alpha \Delta P}$ – коэффициент консолидации грунта;

е) $T = (c_\nu / \alpha) \cdot (t / H^2)$ – фактор времени, который использовал Терцаги при выводе классической теории.

Если использовать эти символы, можно переписать уравнение консолидации (4) в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} = \frac{\partial \lambda}{\partial T}, \tag{9}$$

а уравнение (7) таким образом:

$$\lambda = u' - \frac{\nu}{\Delta P}\left(\frac{\partial e'}{\partial t}\right)^{1/n},$$

где λ – коэффициент консолидации шельфовых грунтов.

Тогда

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\frac{1}{\alpha \nu^n} \Delta P^{n-1} (\lambda - u')^n. \tag{10}$$

Если принимать обозначение параметров:

$$\frac{c_\nu \nu^n}{H^2 (\Delta P)^{n-1}} = R \text{ и } \frac{c_\nu}{\alpha} \cdot \frac{t}{H^2} = T,$$

то уравнение (10) получит вид:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = -\frac{1}{R} (\lambda - u')^n. \tag{11}$$

Для решения однозначных уравнений (9) и (11) используем метод численных интегрирований:

$$\left(\frac{\partial^2 u'}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{u(i-1, j) + u'(i+1, j) - 2u'(i, j)}{\Delta x^2}; \tag{12}$$

$$\left(\frac{\partial \lambda}{\partial T}\right)_{i,j} = \frac{\lambda(i, j+1) - \lambda(i, j)}{\Delta T}. \quad 13)$$

Характер ползучести скелета шельфового грунта при повышении эффективного напряжения может быть выражен уравнением (11), если принять $u' = 0$. Это уравнение может быть проинтегрировано в следующем виде:

$$\lambda = \left[\left(\frac{n-1}{R}\right) T + 1\right]^{\frac{1}{1-n}}. \tag{14}$$

После подстановки получим:

$$\frac{T}{R} = \frac{\dfrac{c_\nu}{\alpha} \cdot \dfrac{t}{H^2}}{\dfrac{c_\nu \nu^n}{H^2 (\Delta P)^{n-1}}} = \frac{t(\Delta P)^{n-1}}{\alpha \nu^n} = T_S \,. \quad (15)$$

При различных значениях n изменяются зависимости λ от T_S, которые характеризуют кривую консолидации шельфовых грунтов (рис. 3).

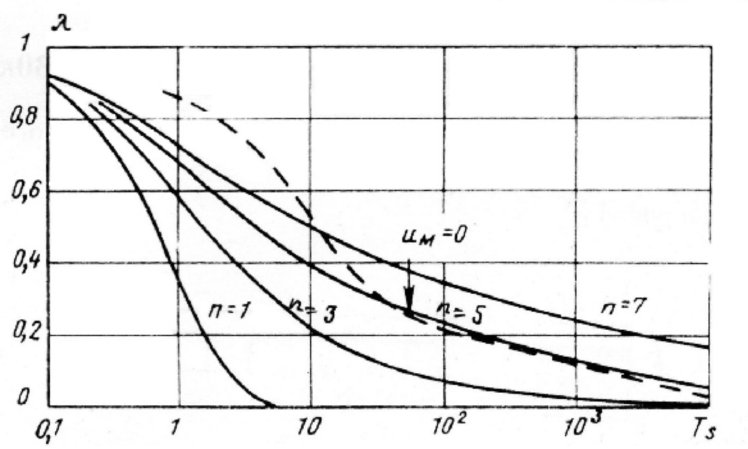

Рис. 3. Кривые консолидации $\lambda = \lambda(T_S)$ для различных значений параметров n образцов из шельфовых грунтов (пунктирная линия совпадает с классической теорией Терцаги)

Если применять образцы малой высоты, равной 20…25 мм, по высоте прибора одометра, то в результате испытаний шельфовых водонасыщенных грунтов получим показатели, представленные на рис. 3 пунктирной кривой.

В качестве примера результатов численного интегрирования уравнений (9) и (11) может служить график на рис. 4. На этом графике нанесены изохроны для коэффициента консолидации λ и рассеяния порового давления u' в зависимости от параметров T и z/H при n = 5 и $R = 10^{-4}$; $n = 10$.

Как видно из рис. 4, рассеяние порового давления u' снижается быстрее, чем коэффициент консолидации λ, однако изохроны зависимостей коэффициентов консолидации λ от расстояния z/H и рассеяния порового давления u' от z/H очень похожи друг на друга.

Зависимости средней величины степени консолидации ψ от времени T при различных значениях параметра R приведены на рис. 5. При R = 0 данные совпадают с решением Терцаги, при котором консолидация является первичной, то есть после порового давления уплотнение происходит за счет уменьшения порового пространства.

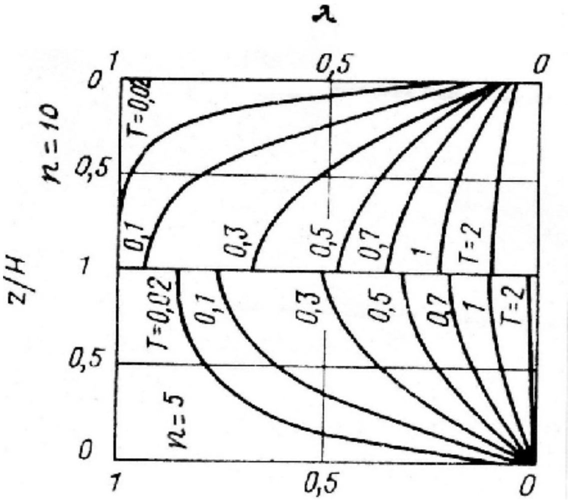

Рис. 4. Зависимости рассеяния порового давления *u'* и коэффициента консолидации λ при *n* = 5 и *n* = 10

С увеличением *R* увеличивается вторичная консолидация и развивается ползучесть скелета грунта.

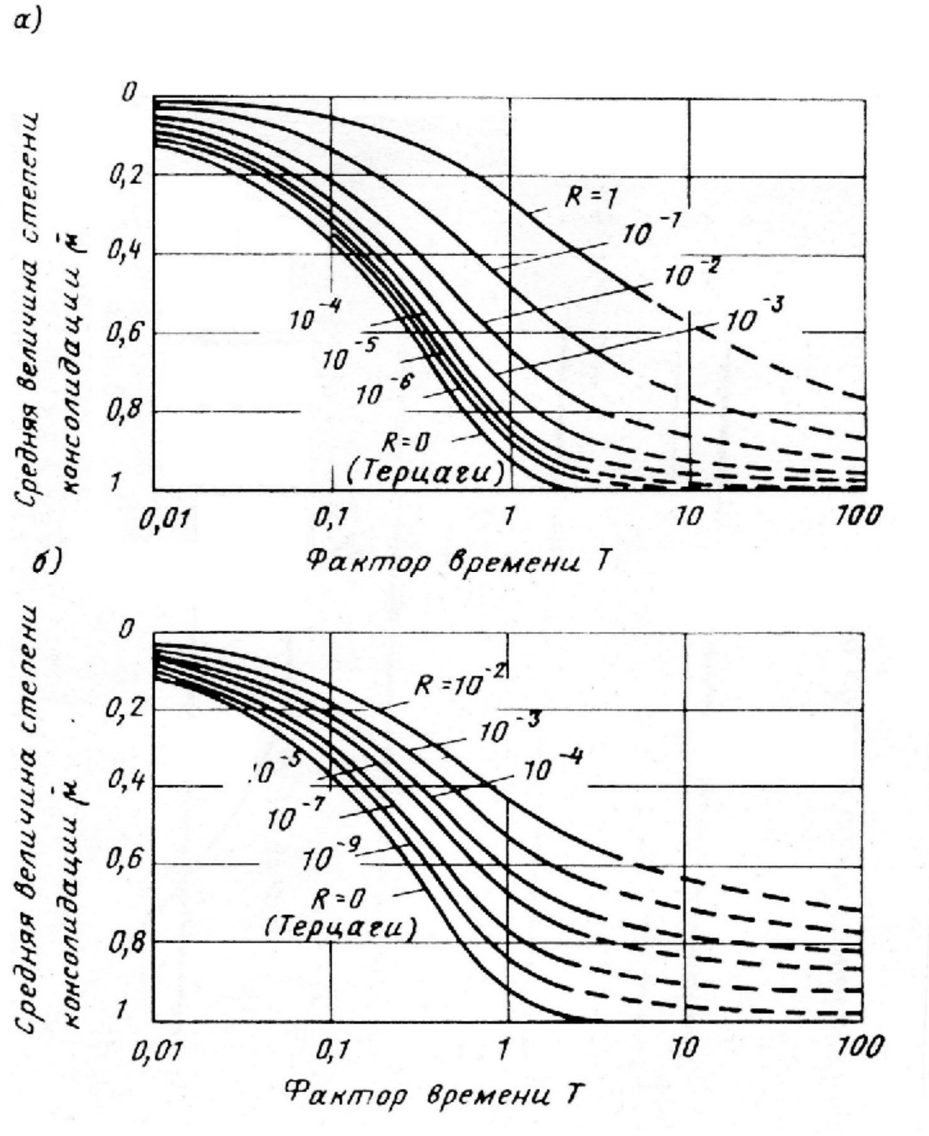

Рис. 5. Кривые консолидации согласно комбинированным моделям при различных значениях параметров *R* и факторов времени *T*: *n* = 5 (*а*), *n* = 10 (*б*). Сплошные линии характеризуют первичную консолидацию, пунктирные – вторичную. При *R* = 0 кривая совпадает с данными классической теории Терцаги

Зависимости средней величины рассеяния порового давления u_m от фактора времени T при различных значениях R приведены на рис. 6.

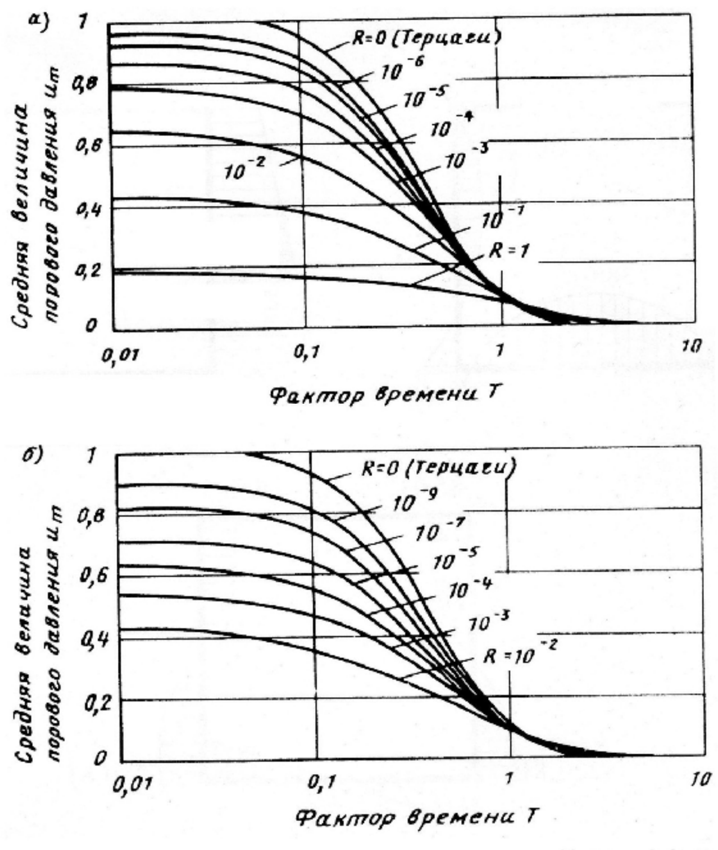

Рис. 6. Кривые рассеяния порового давления согласно предложенной комбинированной реологической модели по различным параметрам R при: *а* – n = 5; *б* – n = 10. Кривая при R = 0 совпадает с данными классической теории Терцаги

Как следует из приведенных рисунков, первая половина реологической комбинированной модели, которая состоит из тела Кельвина, тесно связана с амортизаторами Ньютона и описывает нелинейные процессы консолидации водонасыщенных шельфовых грунтов. Здесь принимается, что процесс консолидации определяется тремя деформационными параметрами, такими как: 1) сжимаемость α, коэффициент вязкости ν, коэффициент нелинейности n; 2) водопроницаемость грунта или коэффициент фильтрации $k_ф$; коэффициент пористости e; 3) мощность уплотняемого слоя H и величина приращения нагрузки ΔP.

Путем испытания образцов из шельфовых грунтов на сжатие в компрессионном приборе (одометре) зафиксировано более быстрое рассеяние порового давления u' при различных значениях R и фактора времени T и установлены первичные и вторичные консолидации от относительной величины приращения нагрузки ΔP. При испытании все образцы имели одинаковую высоту 20 мм.

Наши экспериментальные данные хорошо согласуются с нелинейной частью комбинированной реологической модели по телу Кельвина и при значении R = 0 совпадают с результатами классической теории Терцаги. Вторая часть комбинированной реологической модели, состоящая из тела Максвелла, хорошо описывает линейную часть тензоров напряжений и деформаций шельфового грунта, которые здесь не рассматриваются.

Выводы

Испытанные образцы из шельфовых грунтов (суглинков) со всеми характеристиками показали, что зависимости напряжений и деформаций являются нелинейными и при сжатии происходит процесс консолидации в нелинейном виде шаровых и девиаторных тензоров напряжений и деформаций.

Предложенные комбинированные реологические модели позволяют при испытании образцов из шельфовых грунтов в компрессионном приборе (одометре) и в стабилометре трехосного сжатия проследить нелинейную часть консолидации между напряжением и деформацией с помощью I-й половины модели, которая состоит из тела Кельвина, а II-я половина модели, состоящая из тела Максвелла, характеризирует девиаторную составляющую тензора напряжений и деформаций и вполне обеспечивает линейную часть консолидации шельфовых водонасыщенных грунтов.

1. *Самедов А. М.* Про реологічні особливості лесового ґрунту II типу просадочності / А. М. Самедов, Н. Г. Білоус // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 2. – С. 7–11.

2. *Самедов А. М.* О реологических моделях лессовых просадочных грунтов / А. М. Самедов // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2000. – Вип. 3. – С. 39–44.

3. *Самедов А. М.* Расчет и проектирование подземных сооружений глубокого заложения / Самедов А. М. – К.: Политехника, 2012. – 649 с.

4. *Зарецкий Ю. К.* Теория консолидации грунтов / Ю. К. Зарецкий. – К.: Наука, 1967. – 260 с.

5. *Вялов С. С.* Реологические основы механика грунтов / С. С. Вялов. – М.: Недра, 1978. – 196 с.

6. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – Л.–М.: Госстройиздат, 1959. – 365 с.

7. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – Л.–М.: Госстройиздат, 1961. – 543 с.

8. *Barden L.* Consolidation of Compacted and Unsaturated Clays / L. Barden // Geotechnique, 15. – 1965. – No. 3. – P. 267–286.

9. *Lo K. Y.* Stress–Strain Relationship and Pore Water Pressure Characteristics of a Normally Consolidated Clay / K. Y. Lo // Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. – 1961. – P. 219–224.

10. *Tan Tjong-Kie* Three Dimensional Theory on the Consolidation and Flow of the Clay-layers / Tan Tjong-Kie // Scienlia Sinica. – 1957. – No. 1. – P. 203–215.

11. *Mangel I.* Tassements produits par l_α consolidation L'une couche L'argile de grande epaisseur / I. Mangel // Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris. – 1961. – P. 733–736.

12. *Brinch Hansen I.* Some Stress–Strain Relationships for Soils / I. Brinch Hansen // Proc. 6th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal. – 1965. – P. 231–234.

Надійшла до редакції 3.12.2012 р.
Рекомендовано до друку докт. техн. наук В. Г. Кравцем