

УДК 624.131.6:624.151.2

*СМОЛИН ЮРИЙ ПЕТРОВИЧ, докт. техн. наук, доцент,
yurij.smolin@bk.ru
ВОСТРИКОВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ, канд. техн. наук,
koctas_v@mail.ru
Сибирский государственный университет путей сообщения,
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191*

ПОЛЗУЧЕСТЬ АНИЗОТРОПНОГО ГРУНТА ПРИ ЧИСТОМ СДВИГЕ

Проведены исследования ползучести анизотропного грунта при чистом сдвиге в стабилометре. Чистый сдвиг создавался следующим образом: вначале образец глинистого грунта обжимался в стабилометре гидростатическим напряжением, а после затухания деформации к нему добавлялось вертикальное давление при одновременном уменьшении бокового на величину в два раза меньше вертикального. При этом изменение формы образца происходило без изменения объема. Изменение объема образца контролировалось внутри стабилометра малогабаритной мессдозой, изготовленной авторами на основе кремниевых тензорезисторов. При испытании измерялись деформации ползучести скелета грунта во времени, начиная от условно-мгновенной до длительной. Мгновенная деформация определялась в условиях компрессии с замером индикаторов перемещения с помощью видеосъемки. Стабилометр использовался как компрессионный прибор, т. е. образец испытывался без возможности бокового расширения. Длительная деформация образца во времени фиксировалась до полного затухания процессов деформирования. Для опытов использовался ленточный суглинок с выраженной анизотропией. Опытные кривые деформации ползучести аппроксимировались экспоненциальной функцией [4] меры ползучести. Было установлено, что опытную кривую деформации необходимо было разбивать минимум на две части и каждую часть кривой описывать своей мерой ползучести.

Было установлено, что расчетные данные авторов не в полной мере совпадают с опытными данными. Но если учесть в решении структурную прочность грунта, то следует ожидать лучшего совпадения опытных и расчетных данных. Решение в этом случае во многом усложняются.

Ключевые слова: чистый сдвиг; анизотропный грунт; шаровой тензор напряжений; касательные напряжения; девиатор тензора напряжений; упруго-мгновенная деформация; параметры ползучести скелета грунта; мера ползучести; стабилометр; мессдоза.

*YURIY P. SMOLIN, DSc, A/Professor,
yurij.smolin@bk.ru
KONSTANTIN V. VOSTRIKOV, PhD,
koctas_v@mail.ru
Siberian State Transport University,
191, Koval'chuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia*

ANISOTROPIC SOIL CREEP AT PURE SHEAR

The paper presents investigations of anisotropic soil creep under pure shear in stabilometer. Pure shear is created in the following way. First, the clay soil sample is crimped in stabilome-

ter with hydrostatic stress, and then the strain damping is added with vertical pressure with simultaneous decrease in the lateral pressure at a value two times less than vertical. The change in the sample shape occurs without the change in its volume. The volume change is controlled inside stabilometer by a small load cell created by the authors on the basis of silicon strain gauges. Tests include measurements of creep deformation of the soil skeleton with time starting from relatively instantaneous to long-term. Instantaneous deformation is determined under compression with the measurement of travel indicators using video filming. Stabilometer is used as a compression device, i.e., the sample is tested without a possibility of lateral expansion. Long-term sample deformation is recorded with time until deformation completely decays. Banded loam with a pronounced anisotropy is used for the experiment. Experimental curves of creep strain are approximated by exponential function of the creep measure. It is found that these curves should be split at least into two sections, each section being described by its own creep measure.

Experimental data are not in good agreement experimental data. However, taking into account the structural soil strength will provide better agreement between experimental and theoretical results.

Keywords: pure shear; anisotropic soil; spherical tensor; shear stress; stress tensor deviator; elastic-instantaneous deformation; soil skeleton creep parameters; creep measure; stabilometer; load cell.

Напряженное состояние в точке среды характеризуется нормальными $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ и касательными τ_x, τ_y, τ_z составляющими тензора напряжений. Любой тензор напряжений может быть представлен суммой шарового тензора T_σ^0 , соответствующего всестороннему сжатию, и девиатора D_σ , соответствующего касательным напряжениям:

$$T_\sigma = T_\sigma^0 + D_\sigma. \quad (1)$$

Тензор деформаций T_s также может быть записан в виде шарового тензора деформаций T_s^0 соответственно изменению объема и девиатора деформации D_s , который характеризуется изменением формы образца, обусловлен чистыми сдвигами:

$$T_s = T_s^0 + D_s. \quad (2)$$

Если вычислить деформации грунта отдельно при всестороннем (гидростатическом) давлении и при чистом сдвиге, то сумма этих деформаций будет равна тензору деформаций.

Отдельные виды грунтов, например ленточные отложения, заторфованные массивы и др., обладают выраженной анизотропией, т.е. физико-механические характеристики таких грунтов различные в противоположных направлениях [1]. В общем случае при анизотропии уравнения обобщенного закона Гука имеют шесть линейных однородных зависимостей. В этих уравнениях насчитывается 36 независимых коэффициентов.

Если структура анизотропного грунта обладает симметрией, уравнения закона Гука упрощаются, т.к. некоторые коэффициенты равны нулю или зависят от других коэффициентов:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{13}\sigma_z, \\ \varepsilon_y &= a_{21}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{23}\sigma_z, \\ \varepsilon_z &= a_{31}\sigma_x + a_{32}\sigma_y + a_{33}\sigma_z. \end{aligned} \quad (3)$$

Поскольку грунт в направлении x и y имеет одинаковые физические характеристики, то $a_{11} = a_{21}$, тогда в уравнении (3) имеется всего лишь 4 независимых коэффициента.

При приложении давления на образец деформация чистого сдвига будет складываться из мгновенной деформации и деформации ползучести:

$$\varepsilon_z(t, \tau) = \varepsilon' + \varepsilon'', \quad (4)$$

где ε' – мгновенная относительная деформация; ε'' – относительная деформация ползучести.

Параметры в уравнении (3) запишутся

$$a_{ij} = b_{ij} + c_{ij}, \quad (5)$$

где b_{ij} – упругие характеристики грунта; c_{ij} – мера ползучести грунта.

При чистом сдвиге объемные деформации θ равны нулю:

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0. \quad (6)$$

Тогда

$$(b_{11} + b_{12} + b_{13})(\sigma_x + \sigma_y) + (2b_{13} + b_{33})\sigma_z + (c_{11} + c_{12} + c_{13})(\sigma_x + \sigma_y) + (2c_{13} + c_{33})\sigma_z = 0. \quad (7)$$

Введем обозначения: $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_{\text{бок}}$ – боковое давление; $\sigma_z = \sigma_{\text{ос}}$ – осевое давление.

Подставляя эти обозначения в уравнение (7), будем иметь

$$2(b_{11} + b_{12} + b_{13})\sigma_{\text{бок}} + (2b_{13} + b_{33})\sigma_{\text{ос}} + 2(c_{11} + c_{12} + c_{13})\sigma_{\text{бок}} + (2c_{13} + c_{33})\sigma_{\text{ос}} = 0. \quad (8)$$

Соотношение боковых и осевых давлений с учетом анизотропии и с учетом ползучести скелета грунта будет равно

$$\sigma_{\text{бок}} = -\frac{(2b_{13} + b_{33}) + (2c_{13} + c_{33})}{2[(b_{11} + b_{12} + b_{13}) + (2c_{13} + c_{33})]}\sigma_{\text{ос}}. \quad (9)$$

Если учитывать только упругие характеристики, то

$$\sigma_{\text{бок}} = -\frac{(2b_{13} + b_{33})}{2(b_{11} + b_{12} + b_{13})}\sigma_{\text{ос}}. \quad (10)$$

При $t > 0$ соотношение бокового и осевого давлений для анизотропного грунта при чистом сдвиге будет зависеть не только от упругих характеристик, но и от мер ползучести. Это значит, что во время опыта необходимо изменять боковые и осевые давления, что существенно усложняет процесс проведения эксперимента. Если допустить, что

$$\frac{(2b_{13} + b_{33})}{2(b_{11} + b_{12} + b_{13})} \approx \frac{(2b_{13} + b_{33}) + (2c_{13} + c_{33})}{2[(b_{11} + b_{12} + b_{13}) + (2c_{13} + c_{33})]}, \quad (11)$$

то условие чистого сдвига будет соблюдаться в течение всего процесса деформирования.

После преобразования выражения (11) будем иметь

$$\frac{(2b_{13} + b_{33})}{2(b_{11} + b_{12} + b_{13})} \approx \frac{(2c_{13} + c_{33})}{[c_{11} + c_{12} + c_{13}]} = \text{const}. \quad (12)$$

Уравнение (3) можно записать в ином виде, введя коэффициенты бокового расширения Пуассона ν_1 , ν_2 и модули деформации анизотропного грунта E_1 и E_2 :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E_1}(\sigma_x - \nu_1\sigma_y - \nu_2\sigma_z), \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E_1}(-\nu_1\sigma_x + \sigma_y - \nu_2\sigma_z), \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E_1}\left(-\nu_2\sigma_x + \nu_2\sigma_y + \frac{E_1}{E_2}\sigma_z\right),\end{aligned}\quad (13)$$

где ν_1 и ν_2 – соответственно коэффициенты, характеризующие поперечные и продольные деформации; E_1 и E_2 – соответственно модули деформации в поперечном и продольном направлениях.

Подставляя данные обозначения в уравнение (10), находим соотношение боковых напряжений к осевым при чистом сдвиге при $t = 0$:

$$\sigma_{бок} = -\frac{\left(\frac{1}{E_2} - \frac{2\nu_2}{E_1}\right)}{\frac{2}{E_1}(1 - \nu_1 - \nu_2)}\sigma_{ос}.\quad (14)$$

Для изотропного грунта это соотношение будет иметь вид

$$\sigma_{бок} = -\frac{1}{2}\sigma_{ос}.\quad (15)$$

Подставляя выражение (14) в (13), получим зависимость для определения относительной продольной упругой деформации ε_z анизотропного грунта для случая чистого сдвига при $t = 0$

$$\varepsilon_z = \frac{E_1 - E_1\nu_1 - 2\nu_2^2 E_2}{E_1 E_2 (1 - \nu_1 - \nu_2)}\sigma_{ос}.\quad (16)$$

Полная относительная деформация образца в любой период времени определится как сумма упруго-мгновенной деформации и деформации ползучести:

$$\varepsilon_z(t, \tau) = \sigma_{ос}(\tau) \frac{(E_1(\tau) - E_1(\tau)\nu_1 - 2\nu_2^2 \cdot E_2(\tau))}{E_1(\tau)E_2(\tau)(1 - \nu_1 - \nu_2)} + \sigma_{ос}(\tau)\omega(t, \tau),\quad (17)$$

где первое слагаемое соответствует упруго-мгновенной деформации, второе – деформации ползучести; $\sigma_{ос}(\tau)$ – величина мгновенно приложенной нагрузки; $E_1(\tau)$ и $E_2(\tau)$ – модули условно-мгновенной деформации; $\omega(t, \tau)$ – мера ползучести при чистом сдвиге.

Давление на скелет грунта при чистом сдвиге от приложенной нагрузки до полной деформации образца остается постоянным, поэтому принимаем $\sigma_{ос}(\tau) = q$ и обозначим:

$$a_0 = \frac{E_1 - E_1\nu_1 - 2\nu_2^2 E_2}{E_1 E_2 (1 - \nu_1 - \nu_2)},\quad (18)$$

где a_0 – параметр мгновенной деформации грунта.

Тогда относительная вертикальная деформация анизотропного грунта будет равна

$$\varepsilon_z(t, \tau) = q[a_0 + \omega(t, \tau)]. \quad (19)$$

Согласно экспериментальным данным С.Р. Месчана [2–4], для затухающей линейной деформации ползучести при постоянных нормальном и касательном напряжениях мера ползучести описывается следующим выражением:

$$\omega(t, \tau) = a_1 \left[1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right]. \quad (20)$$

Осадка грунта во времени может быть представлена в виде

$$S(t) = \int_0^h \varepsilon_z(t) dz, \quad (21)$$

где h – высота испытуемого образца.

С учетом выражения (20) полная осадка грунтового образца в условиях чистого сдвига при линейной ползучести будет равна

$$S(t, \tau) = qh \left\{ a_0 + a_1 \left[1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right] \right\}, \quad (22)$$

где a_1 и γ_1 – параметры ползучести скелета грунта при сдвиге (определяются из опыта).

При проведении экспериментальных исследований использовался слоистый ленточный с явно выраженной анизотропией суглинок со следующими фазовыми характеристиками: удельный вес $\gamma = 19,2$ кН/м³, удельный вес частиц $\gamma_s = 28,0$ кН/м³, удельный вес сухого грунта $\gamma_d = 15,1$ кН/м³, влажность $w = 0,23$ д. е., число пластичности $I_p = 15$, показатель текучести $I_L = 0,36$, коэффициент пористости $e = 0,620$.

Мгновенный модуль деформации грунта определялся в стабилометре в условиях компрессии. В момент приложения нагрузки на образец показания деформации индикаторов фиксировались с помощью видеосъемки. Метод измерения деформаций грунта с помощью видеосъемки преследовал цель – определить осадку грунта в достаточно короткие отрезки времени после приложения ступени нагрузки. Начало деформации образца в приборе устанавливалось по моменту, с которого начиналось движение стрелок индикаторов деформометров.

Видеосъемка позволила достаточно подробно восстановить процесс деформирования образца. Съемка деформации образца показала, что в течение примерно 4 с процесс деформирования имеет сложный характер, обусловленный не только деформационными свойствами грунта, но и динамическими явлениями, вызванными внезапным приложением нагрузки.

Исследования показали, что даже с помощью видеосъемки при обжатии образца можно определить мгновенную деформацию не ранее чем через 3–4 с от момента приложения нагрузки [5, 6]. Полученные таким путем деформации могут быть несколько завышены, а мгновенные модули деформации при этом занижены за счет динамического эффекта. Поэтому такие деформации относятся к условно-мгновенным деформациям.

При нагрузке на образец опытного грунта, равной 50 кПа, при $t = 4$ с были получены следующие значения условно-мгновенных модулей деформации: $E_1 = 15$ МПа, $E_2 = 17$ МПа.

Для получения опытным путем параметров меры ползучести грунта при чистом сдвиге использовался стабилометр. Сущность методики испытания заключалась в следующем. Вначале к образцу прикладывалось всестороннее (гидростатическое) давление, которое выдерживалось до полного затухания процессов деформирования. Затем снималась некоторая часть бокового давления и одновременно добавлялась к осевому давлению часть давления, равная:

– для анизотропного грунта

$$\Delta\sigma_{ос} = -\frac{2E_2(1-\nu_1-\nu_2)\Delta\sigma_{бок}}{E_1-2\nu_2E_2}; \quad (23)$$

– для изотропного грунта

$$\Delta\sigma_{ос} = -2\Delta\sigma_{бок}. \quad (24)$$

Возникающее при этом дополнительное напряженное состояние соответствует условию чистого сдвига, при котором меняется только форма образца, а деформации происходят без изменения объема образца.

Напряженно-деформированное состояние выражаем через интенсивность деформации сдвига Γ и интенсивность напряжений сдвига T зависимостями

$$\Gamma = \frac{2}{\sqrt{6}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2}, \quad (25)$$

$$T = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 (\sigma_3 - \sigma_1)^2 (\sigma_2 - \sigma_3)^2}. \quad (26)$$

Здесь

$$\sigma_1 = \sigma_0 + \Delta\sigma_{ос}, \quad (27)$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 - 2\Delta\sigma_{ос}, \quad (28)$$

где σ_0 – гидростатическое давление на образец грунта.

Подставляя (27) в (26), получим

$$T = \sqrt{3}\Delta\sigma_{ос}. \quad (29)$$

Так как объемные деформации при чистом сдвиге равны нулю, то

$$\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon_1. \quad (30)$$

Подставляя ε_3 в (25), получим

$$\Gamma = \sqrt{3}\varepsilon_1. \quad (31)$$

Для анизотропного грунта при чистом сдвиге значения боковых напряжений определяются как

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_0 - \frac{E_2(1-\nu_1-\nu_2)}{2(E_1-2\nu_2E_2)}\Delta\sigma_{ос}. \quad (32)$$

Обозначим
$$\beta = \frac{E_2(1-\nu_1-\nu_2)}{2(E_1-2\nu_2E_2)}. \quad (33)$$

Подставляя (32) в (26), получим

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}}\Delta\sigma(1+\beta). \quad (34)$$

При любом напряженном состоянии деформации линейной ползучести во времени при сдвиге определяются как

$$\gamma_{\text{пол}}(t) = \omega(t, \tau)T, \quad (35)$$

тогда мера ползучести при чистом сдвиге будет равна

$$\omega(t, \tau) = \frac{\gamma_{\text{пол}}(t)}{T}. \quad (36)$$

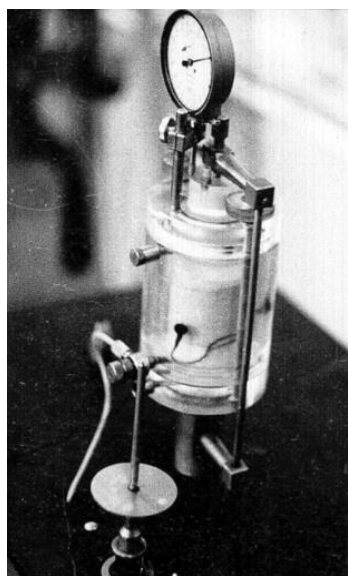


Рис. 1. Стабилометр с вставленной в рабочую камеру тензочувствительной мессдозой [7]

Для того чтобы убедиться в том, что при чистом сдвиге деформации происходят без изменения объема образца, применялась тензочувствительная мессдоза [7], которая помещалась в рабочую камеру стабилометра (рис. 1).

Измерение объемов по вертикали и по горизонтали позволило убедиться в том, что испытание производится без изменения объема: происходит только изменение формы образца.

При проведении опытов по определению параметров меры ползучести при линейной деформации от чистого сдвига вначале на образец в стабилометре прикладывалось всестороннее давление $\sigma_0 = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 200$ кПа. По окончании процесса деформирования создавалось напряженное состояние, соответствующее условию чистого сдвига, т. е. с бокового давления снималось 30 кПа, а к вертикальному давлению добавлялось 15 кПа. Затем опыты проводились на образцах из того же грунта при том же гидростатическом давлении, но при другом напряженном состоянии.

На рис. 2 показаны графики изменения интенсивности деформаций сдвига Γ во времени при соответствующих напряженных состояниях $\Delta\sigma_z$, $\Delta\sigma_x$ и интенсивностях напряжений T , кПа.

На графиках видно, что при напряженном состоянии $\Delta\sigma_z = 45$ кПа, $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = -90$ кПа деформации чистого сдвига носят незатухающий характер вплоть до разрушения. Ниже этого напряженного состояния деформации носят затухающую стадию ползучести. Следовательно, до этого напряженного состояния для данного грунта можно использовать теорию упруго-ползучего тела Маслова – Арутюняна [8, 9].

Опытные кривые затухающей деформации ползучести аппроксимировались функцией вида (20), в результате чего были получены параметры меры ползучести $a_1 = 0,041$, $\gamma_1 = 0,06$, с помощью которых устанавливались вычисленные значения осадки образца по формулам авторов. Расчеты показали, что теоретические данные расходятся с опытными данными в начальные периоды времени, а при больших значениях времени кривые сближаются и данные совпадают. Это в первую очередь зависит от применяемой функции меры ползучести.

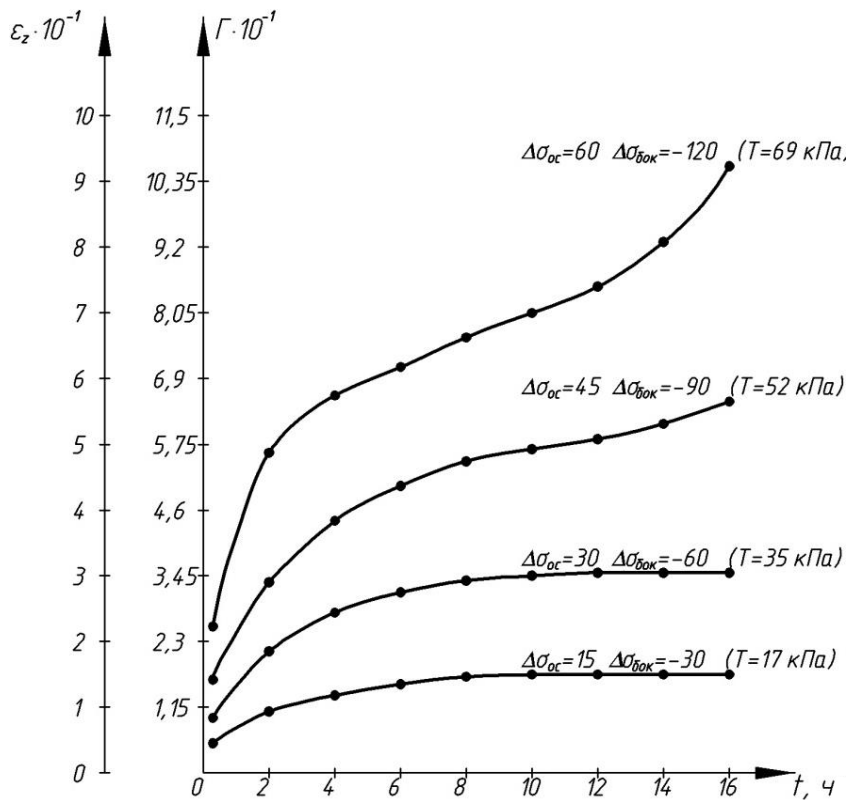


Рис. 2. График изменения деформаций сдвига во времени:
 Г – интенсивность деформаций сдвига; T – интенсивность напряжений; ϵ_z – относительная вертикальная деформация образца грунта

Для удовлетворительного описания начального участка кривой деформации ползучести необходимо определять другие значения параметров той же функцией меры ползучести. В этой связи кривую ползучести лучше будут описывать две пары параметров меры ползучести, и полная осадка грунтового образца в условиях чистого сдвига при линейной ползучести будет равна

$$S(t, \tau) = qh \left\{ a_0 + a_1 \left[1 - e^{-\gamma_1(t-\tau)} \right] + a_2 \left[1 - e^{-\gamma_2(t-\tau)} \right] \right\}, \quad (37)$$

где a_1, γ_1 – параметры меры ползучести начального участка кривой деформации при чистом сдвиге; a_2, γ_2 – параметры меры ползучести конечного участка кривой деформации при чистом сдвиге.

Для нахождения удовлетворительной аппроксимации кривых затухающей ползучести при чистом сдвиге можно использовать и другие функции мер ползучести, например гиперболическую, степенную, логарифмическую, полиномиальную и др.

При сравнении опытных данных с решениями авторов было установлено, что расчетные данные не в полной мере совпадают с опытными данными. Но если учесть в решении структурную прочность грунта, то следует ожидать лучшего совпадения опытных и расчетных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Писаненко, В.П. Об анизотропии деформационных свойств глинистых грунтов Новосибирского Приобья / В.П. Писаненко // Инженерно-геологические условия и особенности фундаментостроения при транспортном строительстве в условиях Сибири : труды НИИЖТа. – Новосибирск, 1977. – Вып. 180. – С. 80–83.
2. Месчан, С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов / С.Р. Месчан. – М. : Недра, 1985. – 342 с.
3. Месчан, С.Р. Применение повторного кручения образцов при определении характеристик прочности глинистых грунтов / С.Р. Месчан // Геоэкология. – 2002. – № 5. – С. 12–14.
4. Флорин, В.А. Основы механики грунтов / В.А. Флорин. – Л. : Госстройиздат, 1959. – Т. 1. – 357 с.
5. Смолин, Ю.П. К методике определения мгновенного модуля деформации грунтов / Ю.П. Смолин, Д.Ю. Корчуганов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2005. – № 8. – С. 109–112.
6. Смолин, Ю.П. К методике определения мгновенных и длительных модулей деформации ползучих грунтов / Ю.П. Смолин, Ю.И. Соловьев // Вопросы инженерной геологии, оснований и фундаментов : труды НИИЖТа. – Новосибирск, 1971. – Вып. 123. – С. 137–146.
7. Буканц, И.З. Малогабаритные грунтовые месдозы на кремниевых полупроводниковых тензорезисторах / И.З. Буканц, Э.А. Самолетов // Вопросы инженерной геологии, оснований и фундаментов : труды НИИЖТа. – Новосибирск, 1971. – Вып. 123. – С. 214–218.
8. Маслов, Н.Н. Физико-техническая теория ползучести глинистых грунтов в практике строительства / Н.Н. Маслов. – М. : Стройиздат, 1984. – 176 с.
9. Арутюнян, Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести / Н.Х. Арутюнян. – М.; Л. : Гос-техтеоретиздат, 1952. – 323 с.

REFERENCES

1. Pisanenko V.P. Ob anizotropii deformatsionnykh svoystv glinistykh gruntov Novosibirskogo Priob'ya [Anisotropy of deformation properties of clay soils in Novosibirsk]. *Proc. NIIZhT*. Novosibirsk, 1977. No. 180. Pp. 80–83. (rus)
2. Meschan S.R. Eksperimental'naya reologiya glinistykh gruntov [Experimental rheology of clay soils]. Moscow: Nedra Publ., 1985. 342 p. (rus)
3. Meschan S.R. Primenenie povtornogo krucheniya obraztsov pri opredelenii kharakteristik prochnosti glinistykh gruntov [Repeated torsion for determination of strength properties of clay soils]. *Geoekologiya*. 2002. No. 5. Pp. 12–14. (rus)
4. Florin V.A. Osnovy mekhaniki gruntov [Soil mechanics principles]. Leningrad: Gosstroyizdat Publ., 1959. V. 1. 357 p. (rus)
5. Smolin, Yu.P., Korchuganov D.Yu. K metodike opredeleniya mgnovennogo modulya deformatsii gruntov [Methodology of calculation of instantaneous modulus of soil deformation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2005. No. 8. Pp. 109–112. (rus)
6. Smolin, Yu.P., Solov'ev Yu.I. K metodike opredeleniya mgnovennykh i dlitel'nykh modulei deformatsii polzuchikh gruntov [Methodology of calculation of instantaneous and long-term modulus of creep soil deformation]. *Proc. NIIZhT*. Novosibirsk, 1971. No. 123. Pp. 137–146. (rus)
7. Bukants I.Z., Samoletov E.A. Malogabaritnye gruntovye mesdozy na kremnievykh poluprovodnikovyykh tenzorezistorakh [Small-size soil load cells on silicon semiconductor tensoresistors]. *Proc. NIIZhT*. Novosibirsk, 1971. No. 123. Pp. 214–218. (rus)
8. Maslov N.N. Fiziko-tekhnicheskaya teoriya polzuchesti glinistykh gruntov v praktike stroitel'stva [Physico-technical theory of creeping clay soils in construction experience]. Moscow: Stroyizdat Publ., 1984. 176 p. (rus)
9. Arutyunyan N.Kh. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [Problems of creep]. Moscow, Leningrad: Gostekhteorizdat Publ., 1952. 323 p. (rus)