



УДК 624.131

**Мирсаяпов И.Т.** – доктор технических наук, профессорE-mail: [mirsayapov@kgasu.ru](mailto:mirsayapov@kgasu.ru)**Королева И.В.** – аспирантE-mail: [korolewa@kgasu.ru](mailto:korolewa@kgasu.ru)**Казанский государственный архитектурно-строительный университет****РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОГО НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ****АННОТАЦИЯ**

Предлагается пространственная модель дилатирующего грунта на основе гипотезы, согласно которой сила сухого трения Кулона отклоняется от пространственной площадки предельного равновесия и действует в плоскости тангенциального скольжения частиц. Объемная деформация грунта во времени описывается в соответствии с теорией наследственной ползучести в виде суммы деформаций изменения объема и деформаций изменения формы с учетом их взаимовлияния.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** глинистый грунт, дилатансия, уравнение деформирования грунтов, предельное напряженное состояние, ползучесть.

**Mirsayapov I.T.** – doctor of technical sciences, professor**Koroleva I.V.** – post-graduate student**Kazan State University of Architecture and Engineering****DESIGNED MODEL OF LONG NONLINEAR DEFORMATION  
OF CLAY SOIL IN A COMPLEX STRESS STATE****ABSTRACT**

The spatial model of dilating soil is proposed. Hypothesis which says that strength dry friction of the Coulomb deflect from platforms of a limiting condition and function on surface slipping was taken as a principle. The strain creep of soil is described according to hereditary creep theory. Volumetric deformation is summed up change of shape and volume.

**KEYWORDS:** clay soil, dilatancy, equation of soil deformation, limiting-equilibrium condition, creep.

В условиях естественного залегания грунтов в массиве под воздействием собственного веса и внешней нагрузки формируется сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние и каждый элементарный объем грунта подвержен действию тензора напряжений. Напряженно-деформированное состояние массива грунта определено, если в каждой его точке (элементарном объеме) с координатами  $X, Y, Z$  известны три компоненты нормальных напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ , три компоненты касательных напряжений  $\tau_{xy}=\tau_{yx}; \tau_{xz}=\tau_{zx}; \tau_{yz}=\tau_{zy}$ , три компоненты линейных деформаций  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ ; три компоненты угловых деформаций  $\gamma_{xy}=\gamma_{yx}; \gamma_{xz}=\gamma_{zx}; \gamma_{yz}=\gamma_{zy}$  и три компоненты перемещений  $u, v, w$ . В предельном по прочности состоянии поверхность скольжения (разрушения) в каждой точке (элементарном объеме) формируется и ориентируется определенным образом по отношению к направлению действия главных напряжений  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  [10].

Экспериментальными исследованиями глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии [8, 9] установлены картина, схема и механизм разрушения опытных образцов, который заключается в следующем: при поэтапном увеличении нагрузки образуются уплотненные зоны в виде пирамид: сверху, в нижней части образца и у боковых граней (рис. 1 а). Геометрические размеры указанных уплотненных пирамид различны и зависят от режима нагружения.

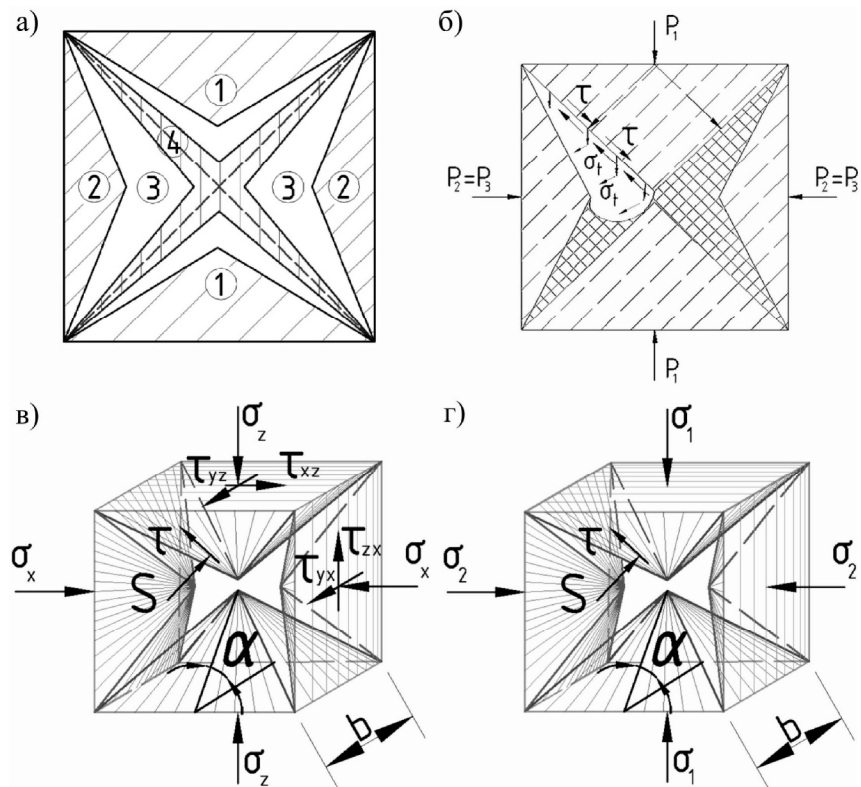


Рис. 1. а – Схема расположения локальных зон различной плотности в образце при трехосных испытаниях: 1 – вертикальные уплотненные пирамиды; 2 – уплотненные пирамиды у боковых граней; 3 – зона однородного напряженного состояния; 4 – зона дилатансии; б – Схема напряженного состояния локальных зон между уплотненными пирамидами; в – Напряженное состояние в элементарном объеме грунта в пространстве  $X, Y, Z$  в произвольный момент времени  $t$  в допредельном состоянии (напряжения  $y_y, \phi_{xy}, \phi_{zy}$  условно не показаны); г – Напряженное состояние в элементарном объеме грунта в пространстве главных напряжений на стадии предельного равновесия (напряжения  $y_3$  условно не показаны)

После разрушения образцов для определения физико-механических характеристик из характерных зон были отобраны пробы грунта и установлены основные физико-механические характеристики [9].

В результате совместного анализа картины разрушения и схемы расположения локальных зон различной плотности (рис. 1 а) можно предположить, что при трехосном сжатии образца грунта возникают различные зоны напряженно-деформированного состояния, т.е. при поэтапном увеличении нагрузки образуются уплотненные зоны в виде пирамид различных размеров и форм в зависимости от режима нагружения: сверху, в нижней части образца и у боковых граней (рис. 1). Деформирование образца происходит за счет движения этих пирамид как жестких тел. В указанных уплотненных зонах не происходит ухудшение физико-механических характеристик грунтов, а их улучшение (увеличение плотности в пределах 11 %,  $c$  – 88 % и  $s$  – 138 %). Негативные процессы, снижающие физико-механические характеристики грунта, локализуются в зоне между этими «пирамидами» (зона 4 рис. 1 а). После разрушения образца путем отбора проб грунта из локальной зоны 4, зафиксировано снижение плотности до 43%,  $c$  – 45% и  $s$  – 67 %. В то же время, круги предельных напряжений, построенные по результатам серии испытаний [9], показывают, что в интегральном объеме при длительном нагружении происходит снижение угла внутреннего трения  $\phi$  в пределах 16 %, удельного сцепления грунта  $c$  – 6 %. Визуальное обследование поверхности сдвига после разрушения образца показало, что грунт в этой зоне подвергается одновременному отрыву и сдвигу (рис. 1 а, 1 б).

Аналогичные схемы разрушения получены в исследованиях Г.Г. Болдырева [1], А.Л. Крыжановского [5], Ниго [12] (рис. 2), которые соответствуют поверхностям нормальных и касательных напряжений, приведенных в [11] (рис. 3).

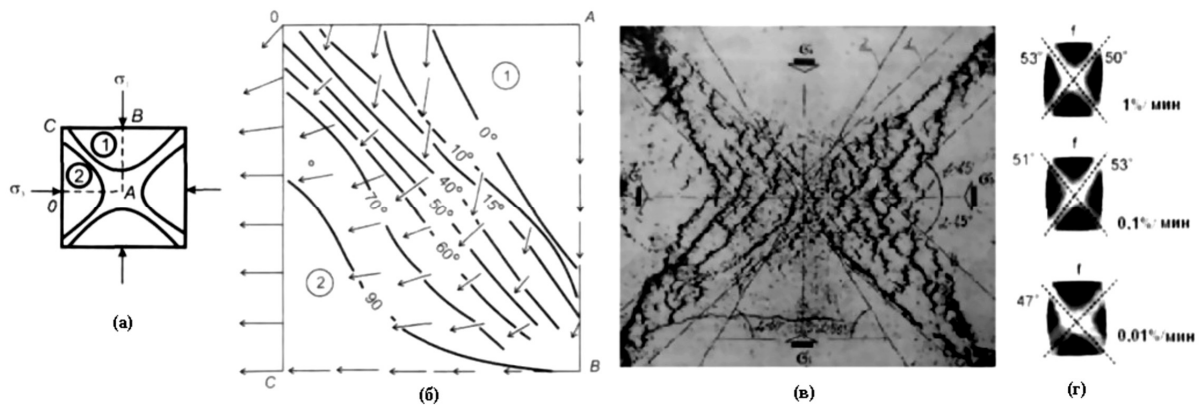


Рис. 2. а – Схема нагружения и разрушения образца грунта (данные Г.Г. Болдырева); б – Изолинии углов наклона векторов перемещений: 1 и 2 – «жесткие», недеформируемые (в пределах точности измерений) зоны в образце грунта (данные Г.Г. Болдырева); в – Внешний вид разрушения образца песчаного грунта в приборе трехосного сжатия кубической формы с гибкими стенками (мембранами) (результат опытов А.Л. Крыжановского); г – Результаты опытов с нормально уплотненной глиной (Higo et al).

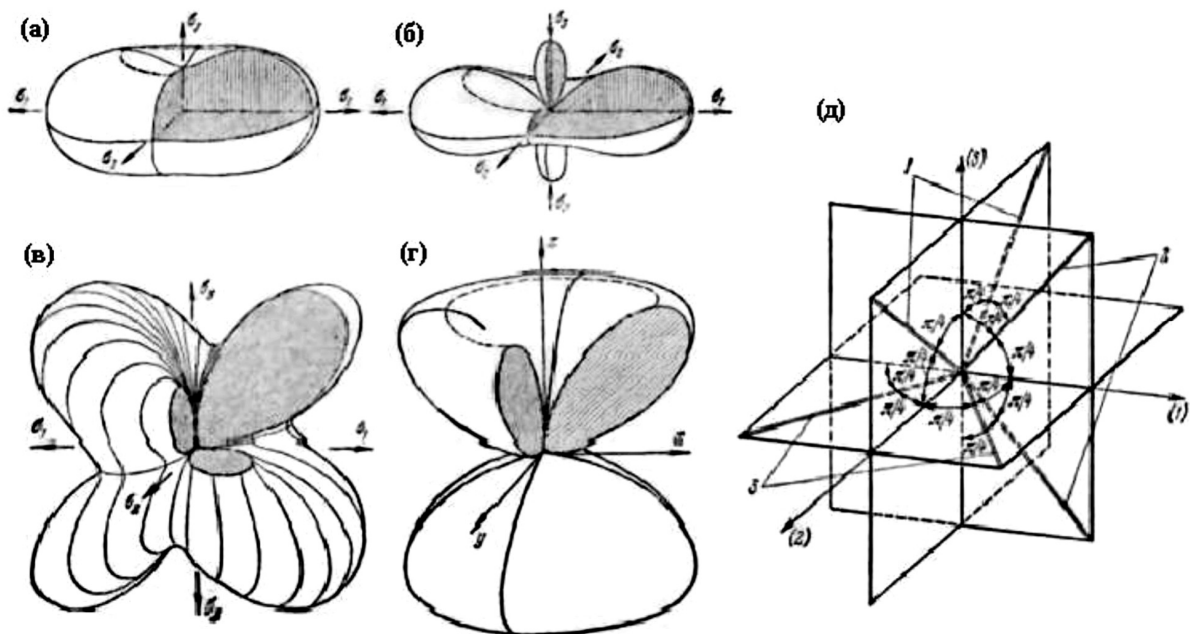


Рис. 3. а – Поверхность нормальных напряжений при пространственном напряженном состоянии в случае одинаковых знаков у всех трех главных напряжений; б – Поверхность нормальных напряжений при пространственном напряженном состоянии в случае разных знаков у главных напряжений ( $y_2=0,5 y_1$ ;  $y_3=-0,5 y_1$ ); в – Поверхность касательных напряжений при  $y_1 \neq y_2 \neq y_3$ ; г – Поверхность касательных напряжений при  $y_1 \neq y_2 = y_3$ ; д – Направления, между которыми имеют место максимальные сдвиги: 1 – направления, между которыми сдвиг равен  $\tau_1 = \sigma_2 - \sigma_3$ ; 2 – направления, между которыми сдвиг равен  $\tau_2 = \sigma_3 - \sigma_1$ ; 3 – направления, между которыми сдвиг равен  $\tau_3 = \sigma_1 - \sigma_2$  [11].

Исходя из результатов экспериментальных исследований [8] (рис. 4 б), объемную деформацию  $e_v$  грунта можно представить в виде:

$$e_v = e_v^0 \pm e_v^D, \tag{1}$$

где  $e_v^0$  – объемная деформация, при всестороннем обжатии;

$e_v^D$  – объемная деформация, вызванная воздействием девиатора напряжений.

Величина  $e_V^0$  является функцией не только от  $S_m$ , но и от сдвигающих напряжений  $t$ , возникающих вследствие различия сопротивления грунта растяжению и сжатию.

$$e_V^0 = f_1^*(S_m, t, t) \tag{2}$$

В связи с тем, что деформации сдвига  $g_i$  зависят от интенсивности касательных напряжений  $t_i$ , от среднего нормального напряжения  $S_m$  и вида напряженного состояния, деформации формоизменения представляются в виде:

$$e_V^D = f_2^*(S_m, t_i, t) \tag{3}$$

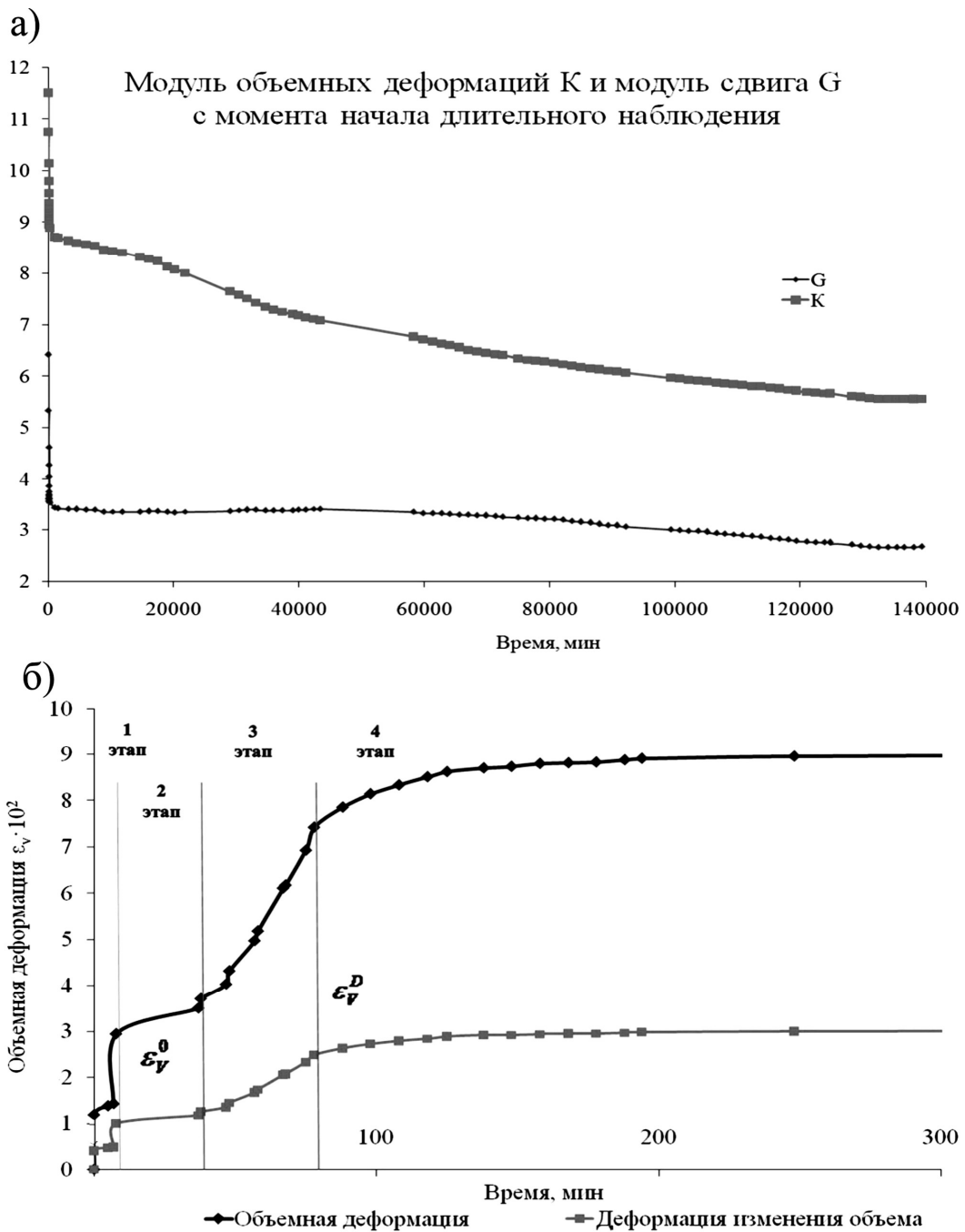


Рис. 4. а – График изменения модуля объемных деформаций К и модуля сдвига G во времени; б – График развития объемных деформаций  $e_v$  и деформаций изменения объема во времени.

Учитывая закономерности изменения объемных деформаций, полученные авторами [8, 9], и результаты опытов С.Р. Месчана [6], в соответствии с которыми коэффициент Пуассона в грунтах остается при испытаниях на ползучесть постоянным ( $n = const$ ), принимаем, что деформации изменения объема и деформации формоизменения развиваются во времени одинаково.

Объемная деформация грунта во времени описывается в соответствии с теорией наследственной ползучести Больцмана-Вольтерра, модифицированной Масловым-Арутюняном применительно к грунтам. Согласно этой теории, полная деформация сдвига или объема при произвольном режиме нагружения записывается в виде:

$$e_i = \frac{s_i(t)}{G(t)} + \frac{1}{G(t)} \int_t^t K_j(t, t) \cdot s_i(t) \cdot dt; \quad (4)$$

$$e_v = \frac{s(t)}{K(t)} + \frac{1}{K(t)} \int_t^t K_V(t, t) \cdot s(t) \cdot dt; \quad (5)$$

где  $G(t)$  и  $K(t)$  – модули сдвига и объемных деформаций;

$K_j(t, t)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость сдвиговой деформации при единичном значении интенсивности нагружения;

$K_V(t, t)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость объемной деформации при единичном значении среднего напряжения.

Исходя из анализа экспериментальных данных, получены ядра ползучести  $K_j(t, t)$  и  $K_V(t, t)$  для грунта при пространственном напряженном состоянии.

При разработке уравнений деформирования глинистого грунта в пространственном напряженном состоянии учитываются процессы упрочнения (старения) глинистого грунта во времени, для чего вводится функция старения  $j(t)$ . С учетом процесса упрочнения ядра ползучести представляются в виде:

$$K_g(s, t-t) = \begin{cases} j_g(t) \cdot \frac{d_{g1}}{(t-t)} \cdot d_{g2} & \text{нпу } 0 \leq t \leq t_{nm} \\ j_g(t) \cdot C(s) & \text{нпу } t > t_{nm} \end{cases} \quad (6)$$

$$K_V(s, t-t) = \begin{cases} j_v(t) \cdot \frac{d_{v1}}{(t-t)} \cdot d_{v2} & \text{нпу } 0 \leq t \leq t_{nm} \\ j_v(t) \cdot C(s) & \text{нпу } t > t_{nm} \end{cases} \quad (7)$$

где  $t_{nm}$  – время начала стабилизации скорости деформирования.

На основании выше изложенного можно заключить, что в начальной стадии длительного трехосного сжатия наблюдается неоднородность напряженно-деформированного состояния в пределах образца грунта в целом. Девиаторное нагружение и длительная выдержка при девиаторном нагружении сопровождается возникновением и развитием множества поверхностей сдвига и разрывов сплошности грунта образца, положение которых меняется в процессе увеличения девиатора и во времени, и, следовательно, отрицательная дилатансия (разрыхление) глинистого грунта при длительном трехосном сжатии локализуется в пределах потенциально возможных площадок предельного равновесия [9]. В связи с тем, что разрыхление (дилатансия) грунта в этих локальных зонах происходит в стесненных условиях (стесненная дилатансия), возникают значительные напряжения дилатансии в грунте вокруг зоны разрыхления, которая является буферной зоной передачи усилий от вертикальных пирамид к зоне ненарушенного грунта (рис. 1 а, 1 б). Это есть механизм взаимодействия образующихся областей сдвигов с зонами уплотнения. В предельном состоянии разрушение глинистого грунта локализуется в зонах между уплотненными пирамидами и на этой стадии в этой зоне условно можно принимать, что напряженно-деформированное состояние образца однородное.

Исходя из установленной схемы разрушения и зон напряженно-деформированного состояния, предлагается обобщенная схема неупругого длительного деформирования глинистых грунтов на основе

модифицированной модели неассоциированного пластического течения В.Н. Николаевского [7], согласно которой сила сухого трения Кулона отклоняется от площадки предельного равновесия и действует в плоскости чисто тангенциального скольжения физических частиц. Определение ориентации таких потенциально опасных площадок требует учета деформированного состояния грунта.

Учитывая, что независимо от степени начальной неоднородности напряженно-деформированного состояния элементарного объема грунта разрушение всегда происходит в пространстве главных напряжений, совмещая пространство главных напряжений  $u_1, u_2, u_3$  и пространство главных деформаций  $e_1, e_2, e_3$  и сохраняя принцип коаксиальности тензоров напряжений и скоростей деформаций [7], примем, что закон сухого трения Кулона связывает проекции сил, действующих на площадках предельного равновесия на нормаль к площадке скольжения и на нее саму. Тогда условие течения при длительном нагружении запишется в виде:

$$|\tau| = S \cdot \text{tgj}(t, \tau) + c_0(t, \tau), \tag{8}$$

где  $S = s_1 \cdot l \cdot l' + s_2 \cdot m \cdot m' + s_3 \cdot n \cdot n'$

$$t = \sqrt{(s_1 \cdot l \cdot m' - s_2 \cdot l' \cdot m)^2 + (s_2 \cdot m \cdot n' - s_3 \cdot m' \cdot n)^2 + (s_3 \cdot n \cdot l' - s_1 \cdot n' \cdot l)^2}$$

$\psi(t, \phi)$  – переменный во времени угол внутреннего трения;

$c_0(t, \phi)$  – переменное во времени удельное сцепление;

$l, m, n$  – направляющие косинусы нормали к площадке предельного равновесия;

$l', m', n'$  – направляющие косинусы нормали к площадке скольжения.

Пространственная ориентация площадок предельного равновесия определяется формулами [7]:

$$l^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{s}_1}; \quad m^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{s}_2}; \quad n^2 = \frac{\bar{I}_3}{\bar{I}_2 \cdot \bar{s}_3}; \tag{9}$$

где  $\bar{I}_2 = \bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 + \bar{s}_2 \cdot \bar{s}_3 + \bar{s}_3 \cdot \bar{s}_1$  и  $\bar{I}_3 = \bar{s}_1 \cdot \bar{s}_2 \cdot \bar{s}_3$  – второй и третий инварианты тензора приведенных главных напряжений  $\bar{s}_i = s_i + H$  ( $i = 1, 2, 3$ );

$H = \frac{c}{\text{ctgj}}$  – всестороннее сжатие, определяемое по гипотезе Кулона-Мора;

$\psi$  – угол внутреннего трения.

Выражения для направляющих косинусов нормали к площадкам скольжения представляются в виде [7]:

$$\left. \begin{aligned} (l')^2 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot de_2 \cdot de_3 - I_2 + \sqrt{I_2^2 - 3 \cdot I_1 \cdot I_3}}{(de_1 - de_2) \cdot (de_1 - de_3)}; \\ (m')^2 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot de_1 \cdot de_3 - I_2 + \sqrt{I_2^2 - 3 \cdot I_1 \cdot I_3}}{(de_2 - de_1) \cdot (de_2 - de_3)}; \\ (n')^2 &= \frac{1}{3} \cdot \frac{3 \cdot de_1 \cdot de_2 - I_2 + \sqrt{I_2^2 - 3 \cdot I_1 \cdot I_3}}{(de_3 - de_1) \cdot (de_3 - de_2)}; \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

где  $de_1, de_2, de_3$  – приращения главных деформаций;

$I_1 = de_1 + de_2 + de_3, I_2 = de_1 \cdot de_2 + de_2 \cdot de_3 + de_3 \cdot de_1, I_3 = de_1 \cdot de_2 \cdot de_3$  – первый, второй и третий инварианты приращения деформаций

Как было указано выше, ориентация потенциально возможных площадок предельного состояния в общем случае не постоянна, а изменяется в процессе неупругого деформирования грунта в соответствии с формулой [5]:

$$a = \arccos \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{de_1^p}{de_3^p}} - \frac{m_{de}}{6}}, \tag{11}$$

где  $m_{de} = \frac{2de_2^p - de_1^p - de_3^p}{de_1^p - de_3^p}$  – параметр вида деформированного состояния (параметр Лоде-Надаи);

$$de_1^p = de_1^p - de_m^p; \quad de_2^p = de_2^p - de_m^p; \quad de_3^p = de_3^p - de_m^p,$$

где  $de_1^p, de_2^p, de_3^p$  – приращения пластических деформаций (с учетом деформаций ползучести);

$e_1, e_2, e_3, e_m$  – соответственно линейные и объемные деформации.

Исходя из вышеизложенной модели и результатов экспериментальных исследований (рис. 1), условие длительной прочности при трехосном сжатии представляется в виде:

$$4 \cdot [s_v(t) \cdot A_{sh} \cdot \cos a_1(t) + t_v(t) \cdot A_{sh} \cdot \sin a_1(t)] \geq s_1 \cdot A_1; \quad (12)$$

где  $A_{sh} = \frac{b^2}{4 \cos a_2(t)}$  – площадь поверхности боковых граней пирамиды;

$A_1 = b^2$  – площадь грани куба;

$a_1$  – угол наклона площадки предельного равновесия;

$a_2$  – угол наклона площадки сдвига;

$s_v(t) = s_1 \cdot l(t) \cdot l'(t) + s_2 \cdot m(t) \cdot m'(t) + s_3 \cdot n(t) \cdot n'(t) + s_d(t)$  – нормальные напряжения;

$s_d(t) = \frac{E}{(1+n) \cdot r} \cdot \Delta d_d$  – дилатантные напряжения;

$t_v(t) = S \cdot tg j_0(t, t) + c_0(t, t)$  – касательные напряжения на площадке предельного равновесия.

Таким образом, прочность грунта при длительном трехосном сжатии зависит от изменения угла внутреннего трения, удельного сцепления и угла наклона плоскости предельного равновесия.

Согласно кинетической теории деформирования грунтов, предложенной С.С. Вяловым, Ю.К. Зарецким и др. [2, 4], разрушение наступает, когда степень поврежденности микротрещинами в зоне предельного равновесия достигает критического значения.

Как отмечает С.С. Вялов [2], снижение прочности грунта во времени происходит, в основном, за счет уменьшения сил сцепления, тогда как угол внутреннего трения меняется незначительно.

Опираясь на результаты исследований [1, 2, 4, 8, 9], можно представить следующую схему развития деформаций ползучести и изменения длительного сопротивления разрушению. В зависимости от величины и продолжительности действия нагрузки в многофазном глинистом грунте происходят два взаимно компенсирующих явления: упрочнение, обусловленное залечиванием дефектов и более плотной перекомпоновкой частиц, и разупрочнение, вызванное переориентацией частиц, а также образованием и развитием микро и макротрещин (рис. 1 б). В тех случаях, когда разупрочнение начнет превалировать над упрочнением, возникает стадия разрушения и прогрессирующей ползучести. В этой стадии продолжается интенсивный распад микроструктуры и переориентация частиц, причем эти процессы охватывают не весь объем грунта, а лишь зоны предельного равновесия с пониженным значением сопротивления, где происходит развитие трещин.

Учитывая вышеизложенное, выражение, учитывающее изменение удельного сцепления между частицами грунта, представляется в общем виде:

$$c_0(t, t) = K_{lct}^M \cdot q(S), \quad (13)$$

где  $q(S)$  – некоторая функция суммарной длины трещин  $S$ ;

$K_{lct}^M$  – коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещин в грунте.

Решая уравнение (11) относительно  $S$  и учитывая, что  $K_{lct}^M = \sqrt{2Eg}$ , в соответствии с [3] получим зависимость критической длины трещин от заданной внешней нагрузки  $T$ :

$$s_* = T^{-1} \cdot \left( \frac{T}{\sqrt{2Eg}} \right) \quad (14)$$

где  $T^{-1}$  – обратная по отношению к  $(T)$  функция, которая является возрастающей.

В дальнейшем, используя методику, предложенную в [3], после некоторых преобразований и упрощений получаем функцию снижения прочности грунта (удельное сцепление) во времени.

$$h(t, t_1) = m(t, t_1) \cdot I(t, t_1) \cdot \sqrt{\frac{K(t_1)}{K(t)}} \cdot \frac{1}{1 + K(t_1) \cdot C(t, t_1)} \quad (15)$$

Тогда удельное сцепление между частицами с учетом фактора времени представится в виде:

$$C_0(t, t_1) = C_0(t_1) \cdot m(t, t_1) \cdot I(t, t_1) \cdot \sqrt{\frac{K(t_1)}{K(t)}} \cdot \frac{1}{1 + K(t_1) \cdot C(t, t_1)}, \quad (16)$$

где  $C(t, \phi_1)$  – мера объемной ползучести грунта,

$C_0(\phi_1)$  – начальное значение удельного сцепления грунта при кратковременном нагружении;

$m(t, \phi_1)$  – функция упрочнения грунта за счет восстановления водно-коллоидных связей;  
 $l(t, \phi_1)$  – функция упрочнения за счет восстановления структурных связей грунта при длительном деформировании.

Изменение угла внутреннего трения грунта определяется в зависимости от изменения ориентации площадок предельного равновесия при длительном неупругом деформировании.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. – Пенза, 2008. – 696 с.
2. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с.
3. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей. – М.: Высшая школа, 1991. – 288 с.
4. Зарецкий Ю.К., Вялов С.С. Вопросы структурной механики глинистых грунтов. // Основания, фундаменты, механика грунтов, 1971, № 3.
5. Крыжановский А.Л., Вильгельм Ю.С., Рахманов Т. Определение угла внутреннего трения сыпучих грунтов в трехосной аппаратуре и сдвиговых приборах. // Основания, фундаменты, механика грунтов, 1983, № 6. – С. 24-27.
6. Месчан С.Р. Экспериментальная реология глинистых грунтов. – М.: Недра, 1985. – 341 с.
7. Миронов В.А., Соф'ин О.Е. Модель предельного течения дилатирующих грунтов при сложном напряженном состоянии. // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Геотехника Беларуси: наука и практика», № 1-2. – Минск, 2003. – С. 71-75.
8. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Деформации глинистых грунтов при трехосном режимном длительном нагружении. // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сборник трудов научно-технической конференции / Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – С. 253-257.
9. Мирсаяпов И.Т., Королева И.В. Физико-механические свойства глинистых грунтов при длительном трехосном сжатии. // Вестник гражданских инженеров, 2011, № 1 (26). – С. 82-87.
10. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2005. – 488 с.
11. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.1. – М.: Высшая школа, 1978. – 790 с.
12. Higo Y., Oka F. Kodakat T., Kimoto S. A Three – Dimensional Elasto-Viscoplastic Stran Localization Analysis of Water-Saturated Clay. Geo-Research Institute, Osaka, Japan, Vol. 86, 2006. – P. 3205-3240.

### REFERENCES

1. Boldyrev G.G. Methods definition mechanical properties of soils. Sostoyanie voprosa. – Penza, 2008. – 696 p.
2. Vyalov S.S. Rheological principles of soil mechanics. – M.: HSPH, 1978. – 447 p.
3. Zaytsev Y.V. Mechanic destructions for builder. – M.: HSPH, 1991. – 288 p.
4. Zaretskii Yu.K., Vyalov S.S. Structural mechanics of clay soils. // Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1971, № 3.
5. Kryzhanovskii A.L., Vil'gel'm Yu.S., Rakhmanov T. Determination of the angle of friction of granular soils in triaxial apparatus and shear devices // Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1983, № 6. – P. 24-27.
6. Meschyan S.R. Experimental rheology of Clayey Soils. – M.: Nedra, 1985. – 341 p.
7. Mironov V.A., Sof'in O.E. Limiting-yield model for dilating soils in a complex stress state. Budaun. Stroit., № 1-2. – Minsk, 2003. – P. 71-75.
8. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Deformation of clay soil for long operational triaxial compression. The collection of proceedings/ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. – SPb., 2010. – P. 253-257.
9. Mirsayapov I.T., Koroleva I.V. Physic and mechanical properties of clay soils an long triaxial compression. // Bulletin of Civil Engineers, 2011, № 1 (26). – P. 82-87.
10. Ter-Martirosyan Z.G. Soil mechanics. – M.: Publishers ASV, 2005. – 488 p.
11. Filin A.P. Applied mechanics of deformable solid. Vol. 1. – M.: HSPH, 1978. – 790 p.
12. Higo Y., Oka F. Kodakat T., Kimoto S. A Three – Dimensional Elasto-Viscoplastic Stran Localization Analysis of Water-Saturated Clay. Geo-Research Institute, Osaka, Japan. Vol. 86, 2006. – P. 3205-3240.