

УДК 624.131.543

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА И ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕОПАСНОГО МАССИВА

© 2022 г. Г. П. Постоев^{1,*}, А. И. Казеев¹, М. М. Кучуков¹¹ Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН), Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

*E-mail: opolzen@geoenv.ru

Поступила в редакцию 04.04.2022 г.

После доработки 17.04.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

Напряжения в точках массива определяются и распределяются по закону Кулона–Мора в главных напряжениях, в условиях компрессионного сжатия. Влияние склона и развитие склоновых процессов вызывают в массиве, в соответствии с процессами диссипации, снижение напряжений в точках. Результаты экспериментальных исследований (лабораторных, стендовых и натуральных) свидетельствуют, что закономерные процессы снижения напряжений в точках массива вызывают деформации грунтов уже на допредельном этапе состояния массива. Но они могут быть причиной образования трещин в несущих конструкциях сооружений и возникновения опасных неравномерных осадок их фундаментов.

Ключевые слова: закон Кулона–Мора, напряженно-деформированное состояние, диссипация, боковой распор, снижение напряжений, лабораторные, стендовые и натурные испытания, склоновые процессы, осадка массива

DOI: 10.31857/S0869780922040063

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшими задачами геоэкологии, инженерной геологии и механики грунтов являются: выявление условий безопасного освоения исследуемых территорий, в частности своевременное предупреждение о подготовке разрушительных деформационных процессов в грунтовых массивах (оползни, карстовые провалы и др.), обоснование допустимых осадок основания зданий и сооружений, прогнозирование условий исчерпания несущей способности основания и нарушения устойчивости проектируемых и существующих сооружений. В настоящее время расчеты напряженно-деформированного состояния исследуемых грунтовых массивов производятся на основе математического аппарата теории упругости. Однако одно из основных условий применения теории упругости к грунтам – прямая пропорциональность между их деформациями и действующими напряжениями в допредельном состоянии. Вместе с тем основные деформации в массиве начинаются, когда состояние грунтов (в условиях компрессионного сжатия и распределения напряжений по Кулону–Мору) в локальной зоне силового возмущения (зоне влияния склона) приближается к предельному. В связи с этим необходим переход от рассмотрения прочности грунта и напряжений в точке к оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) в указанной

зоне, например, вследствие разгрузки напряжений по законам диссипации [7] в оползнеопасном коренном массиве, вызванной развитием в нем деформаций.

Ниже рассматриваются механизм и закономерности изменения НДС в точках оползнеопасного коренного массива (в зоне границы со склоном) на этапе сохранения его устойчивости и отсутствия оползневых деформаций в коренных грунтах.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ОБРАЗЦЕ

Условием прочности грунта по Кулону–Мору является выражение:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2c \cdot \operatorname{ctg} \varphi} = \sin \varphi, \quad (1)$$

где σ_1 и σ_3 – соответственно наибольшее и наименьшее главные напряжения.

Выражение (1) может быть преобразовано в уравнение [5]:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_{str}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2)$$

где σ_{str} – структурная прочность грунта.

Из (2) следует, что при $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_{str}$, а при $\sigma_1 > \sigma_{str}$ имеет место прямая пропорциональность между σ_3 и $(\sigma_1 - \sigma_{str})$ в условиях отсутствия поперечных деформаций.

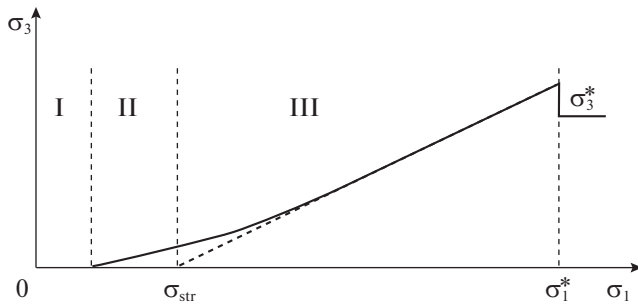


Рис. 1. Диаграмма бокового распора и фазы работы глинистого грунта в компрессионных условиях (по Е.И. Медкову).

Физически структурная прочность грунта на сжатие соответствует предельному давлению, которое может выдержать структурный каркас грунта без разрушительных деформаций. Графически структурная прочность отсекается на оси абсцисс диаграммы Мора предельным кругом Мора, проходящим через начало координат, т.е. как и из (2) при $\sigma_3 = 0$, $\sigma_1 = \sigma_{str}$. При $\sigma_1 \leq \sigma_{str}$ прочность структурных связей сохраняется (для $\sigma_1 = \sigma_{str}$ она полностью отобработана).

Экспериментально структурная прочность σ_{str} может быть определена при испытаниях грунта на одноосное сжатие – как предельное давление на образец грунта; или по диаграмме бокового распора при испытаниях на стабилометре М-2, в соответствии с методикой, разработанной профессором Е.И. Медковым [4].

Уравнения (1), (2) определяют, что грунт “раздавливается” вертикальным давлением, но находится в условиях компрессии (невозможности боковых деформаций). Активные горизонтальные (боковые) главные напряжения распора (напора) уравновешены равными им напряжениями отпора. Могут иметь место деформации уплотнения под вертикальной сжимающей нагрузкой. Но реально эти деформации возможны лишь при условии:

$$\sigma_1 > \sigma_{str} \quad (3)$$

Условие (3) означает, что структурная прочность преодолена, и при дальнейшем росте вертикального давления грунт в данной точке (образце) ведет себя как пластическое тело: между приращениями вертикального и горизонтального напряжений соблюдается прямая пропорциональность. Это означает, что и связные глинистые грунты, и полускальные, и скальные при соответствующих давлениях на грунт, согласно (2), приобретают общие закономерности формирования НДС [6].

Согласно исследованиям П.А. Ляшенко [3], в компрессионном испытании при $\sigma_1 > \sigma_{str}$ грунт дробится на множество клиньев. И в штамповых испытаниях образуются подобные же клинья, плотно прилегающие друг к другу. Образовавшиеся клинья трансформируют связный грунт в

дисперсный несвязный материал, для которого характерны пластические деформации, а при недопущении боковых деформаций возникает линейная зависимость между наибольшим (за минусом структурной прочности грунта) и наименьшим главными напряжениями.

Таким образом, структурная прочность является важнейшей характеристикой грунта, определяющей сопротивление внешнему давлению структурных связей между частицами грунта существующего структурного каркаса. В этой связи проявляется общность между связными и скальными грунтами, имея в виду, что

$$\sigma_{str} = R_c \quad (4)$$

где R_c – предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов [6].

При одноосном сжатии, когда вертикальное (осевое) давление на грунт σ_1 превысит R_c , происходит деформирование структуры грунта, растрескивание, разделение на отдельные агрегаты и разрушение образца.

Процесс сжатия грунта в условиях невозможности боковых деформаций с измерением вертикального и бокового давления исследован (рис. 1) профессором Е.И. Медковым [4].

Е.И. Медков выделил три характерные фазы при сжатии глинистого грунта:

I – вертикальные (осевые) напряжения σ_1 ниже предела упругости. Наблюдаются упругие вертикальные деформации грунта, боковой распор σ_3 отсутствует;

II – может появиться плавный рост бокового распора (для пластичных грунтов). В грунтах с жесткими связями σ_3 в этой фазе практически отсутствует; кроме упругих деформаций в данной фазе возникают также локальные упругопластические сдвиги, особенно при приближении к предельным давлениям;

III – характеризуется линейной зависимостью между приращениями вертикального давления и бокового распора в компрессионном испытании образца грунта и при незначительном снижении σ_3 возникают пластические деформации, и затем по достижении $\sigma_3 = \sigma_3^*$ (при $\sigma_1^* = \text{const}$, см. рис. 1) происходит разрушение грунта.

В сыпучих грунтах структурная прочность практически отсутствует и соотношение между σ_1 и σ_3 соответствует фазе III, что следует также из критерия Кулона–Мора (3) при $\sigma_{str} = 0$.

Таким образом, **основные закономерности**, вытекающие из закона Кулона–Мора, для грунта в образце заключаются в следующем:

– закон определяет сжатие грунта в условиях компрессии, закономерности изменения главных напряжений в соответствии с исходной прочностью грунта;

– закон позволяет определить предел структурной прочности грунта в соответствии с исход-

ными значениями характеристик прочности грунта φ , c :

$$\sigma_{str} = 2c \cdot \operatorname{tg} \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right), \quad (5)$$

т.е. $\sigma_{str} = \sigma_1$ при $\sigma_3 = 0$;

– между приращениями осевого σ_1 и бокового σ_3 напряжений существует прямая пропорциональность при $\sigma_1 > \sigma_{str}$;

– для одного и того же грунта отношение приращений напряжений является константой (зависит от φ), т.е. $m = \Delta\sigma_3/\Delta\sigma_1 = \operatorname{const} = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$;

– для большинства глинистых грунтов значение φ попадает в интервал $15^\circ - 25^\circ$; при этом пределы изменения величины m от 0.4 до 0.6 (следовательно, ориентировочно может быть принято среднее значение $m = 0.5$);

– для песчаных грунтов структурная прочность $\sigma_{str} = 0$;

– для грунтов с жесткими связями (полускальных, скальных) структурная прочность (длина отрезка на оси абсцисс) многократно увеличивается по сравнению с глинистыми грунтами.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ТОЧКЕ МАССИВА. ИСХОДНОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ (НДС)

На i -м горизонте массива в исходном состоянии (с горизонтальной дневной поверхностью массива) под действием активного вертикального наибольшего главного сжимающего напряжения в каждой точке $\sigma_{1,i}$, в соответствии с законами механики грунтов, возникают два взаимно перпендикулярных равных напряжения распора (до возникновения силового возмущения в массиве) на глубине Z_i :

– вертикальное напряжение:

$$\sigma_{1,i} = \gamma Z_i; \quad (6)$$

– горизонтальные напряжения распора:

$$\sigma_{2,i} = \sigma_{3,i} = m (\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}); \quad (7)$$

где $m = \operatorname{tg}^2(45 - \varphi/2)$.

Соответственно закон Кулона–Мора получает вид:

$$\frac{\sigma_{3,i}}{\gamma Z_i - \sigma_{str,i}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (8)$$

Здесь используется значение структурной прочности для грунта в i -й точке массива, а для удельного веса γ берется среднее значение для вышележащих масс над i -й точкой.

По условиям компрессии горизонтальные деформации отсутствуют, т.е. сжатие грунта происходит в условиях невозможности боковых деформаций, но нахождение элементарного объема

(i -й точки) грунта в массиве накладывает свои особенности. Во всех точках горизонта на глубине Z_i состояние грунта определяется уравнением Кулона–Мора (8), т.е. **между распором в точке и отпором окружающего грунта имеет место равновесие.**

В i -й точке в зависимости от соотношения $\sigma_{1,i}$ и $\sigma_{str,i}$ грунт может находиться в одной из трех фаз по Е.И. Медкову.

Пластическое деформирование грунта, когда $\sigma_{1,i}$ превышает $\sigma_{str,i}$ (фаза III), препятствует применению теории упругости для расчетов НДС в этих зонах (горизонтах) массива. Критерий прочности грунта Кулона–Мора (уравнения (1)–(4)) как раз определяет наличие таких горизонтов на глубинах Z_i при $\gamma Z_i > \sigma_{str}$ (где γ – среднее значение удельного веса толщи над i -й точкой).

Чем больше $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$, тем более увереннее следует ожидать большую раздробленность грунта (при $\varphi_i = \operatorname{const}$), т.е. дробление на клинья, агрегаты, плотно прилегающие друг к другу, с сомкнутыми трещинами.

Поскольку жесткие боковые вертикальные стенки (как в одомере), ограничивающие элементарный объем грунта, отсутствуют, возможна незначительная податливость грунта (проявление боковых и вертикальных деформаций) при изменении φ_i от точки к точке. Вследствие этого процесса в грунте одного генезиса на различных глубинах толщи может формироваться соответствующая значению γZ_i прочность грунта на глубине Z_i , в основном за счет изменения величины сцепления.

В возможном слабом прослое на глубине Z_i , при $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i = \operatorname{const}$ может возникать большее значение бокового давления (горизонтальное главное напряжение) по сравнению с окружающим грунтом, вследствие меньших прочностных характеристик ($\sigma_{str,i}$ и φ_i) грунта прослоя, см. (8).

$$\sigma_{3a,i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi_i}{2} \right). \quad (9)$$

При этом состояние массива остается стабильным, действует критерий Кулона–Мора (уравнения (1)–(4)). Силовое возмущение при локальном снижении $\sigma_{str,i}$ и φ_i в замкнутом прослое не возникает, поскольку прослой заземлен в более прочных грунтах, в которых мобилизуется соответствующее значение отпора, определяющее равновесие в этой локальной зоне.

Таким образом, **основные закономерности, вытекающие из закона Кулона–Мора, в исходном состоянии грунтового массива** заключаются в следующем:

– закон определяет сжатие грунта в массиве под действием вертикального наибольшего напряжения (геостатического давления) $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ в условиях компрессии;

– в верхней части массива, где вертикальное давление γZ_i от веса грунтов не превышает значе-

ние структурной прочности, в i -й точке отсутствуют горизонтальные напряжения распора (напора). Грунт находится в фазах I–II (по Е.И. Медкову), практически при полном отсутствии деформаций в соответствующих точках;

– при превышении вертикальным давлением предела структурной прочности $\sigma_{str,i}$ грунта на горизонте Z_i устанавливается равновесное напряженно-деформированное состояние, в соответствии с характеристиками механических свойств грунта (c_i ; Φ_i ; γ);

– для каждого горизонта массива могут быть свои особенности равновесного состояния грунта в зависимости от значений $\sigma_{str,i}$, Φ_i и действующих на глубине Z_i напряжений;

– в массиве на горизонтальной плоскости на глубине Z_i горизонтальные напряжения распора p_i (давление грунта в точке) появляются, когда вертикальное давление $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ (наибольшее главное напряжение) превышает структурную прочность грунта, $\gamma Z_i > \sigma_{str}$, т.е.:

$$p_i = \sigma_{2,i} = \sigma_{3,i} = (\gamma Z_i - \sigma_{str,i}) \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right); \quad (10)$$

– давление распора p_i в точке геологической среды имеет то же понятие (по закону Кулона–Мора), как и атмосферное давление в воздушной среде (по закону Паскаля, с учетом высоты земной поверхности) или давление воды в i -й точке водоема. Соответственно с (10), закон Кулона–Мора для оценки НДС в точке приобретает вид:

$$\frac{p_i}{\gamma Z_i - \sigma_{str,i}} = \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right); \quad (11)$$

– в массиве с ростом глубины Z_i , т.е. при нарастающем значении вертикального (геостатического) давления, для одного и того же грунта имеет место увеличение структурной прочности грунта за счет повышения величины сцепления в уплотненном под большим давлением грунте (Φ изменяется значительно меньше или почти не изменяется);

– в соответствии с вышеизложенным грунт одного и того же генезиса, залегающий на разных глубинах массива, может иметь разные значения сцепления c_i и структурной прочности $\sigma_{str,i}$.

ЗАКОН КУЛОНА–МОРА ДЛЯ ГРУНТА В ТОЧКЕ МАССИВА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОГО (ДОПРЕДЕЛЬНОГО) ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТА

Рассматривается НДС, которое возникает в **коренном грунтовом массиве** с появлением силового возмущения, например, в виде разгрузки напряжений в локальной зоне у границы с оползневой очагом. В очаге имеет место развитие блокового оползня типа сжатия–выдавливания с

характерным ступенчатым рельефом. Выделяется дугообразная бровка оползневого склона, стенка срыва (откос коренного массива). Обозначается центральный створ оползневого участка.

Как изменяется НДС в коренном массиве в i -й точке рассматриваемого горизонта, удаленной от центра зоны силового возмущения на расстоянии r_i ?

К настоящему времени установлено, что формирование оползневого блока в коренном массиве происходит как образование диссипативной геологической структуры [7]. При этом применительно к оползневому очагу определяются базис диссипации, основные параметры ДГС и условия предельного состояния нового блока перед его отделением от коренного массива. По-видимому, образование оползневого блока определяет начало нового этапа диссипации, хотя и при унаследованном базисе диссипации (горизонтальной поверхности скольжения оползневых блоков), но пока при отсутствии ДГС с проявлением соответствующих границ.

Хотя в коренном массиве и восстанавливается (после отделения блока) исходное НДС вблизи оползневого очага, но проявляется его влияние на изменение значений давления распора в точках коренного массива, расположенных выше базиса диссипации (базиса ранее отделившегося блока). В каждой точке на горизонте Z_i появляется вектор напряженности (по силовой линии), ориентированный к центру возмущения (центру оползневого очага). Соответственно условия компрессионного сжатия в точке, удаленной от вертикальной оси, проходящей через центр силового возмущения, на расстояние r_i , представляются в виде напряжений, действующих на элементарный единичный отрезок дуги $dS = 1$, радиусом r_i (с выпуклой стороны – напряжения распора).

В соответствии с законом Кулона–Мора происходит ориентация главных горизонтальных напряжений (составляющих давления распора) по возникшим линиям напряженности. Появляются наименьшее и среднее горизонтальные напряжения (рис. 2).

Вследствие локальности силового возмущения эквипотенциальные линии напряженности на рассматриваемом горизонте представляют собой дуги окружности радиусом r_i . Среднее горизонтальное напряжение ориентируется по касательной к эквипотенциальной линии (см. рис. 2) радиусом r_i в краевых точках дуги $dS = 1$, в точке M (рис. 3):

$$\sigma_{2ri} = m(\sigma_1 - \sigma_{str,i}) \quad (12)$$

Наименьшее горизонтальное напряжение в i -й точке ориентируется по силовой линии, направленной по радиусу к центру зоны разгрузки, и определяется по выражению:

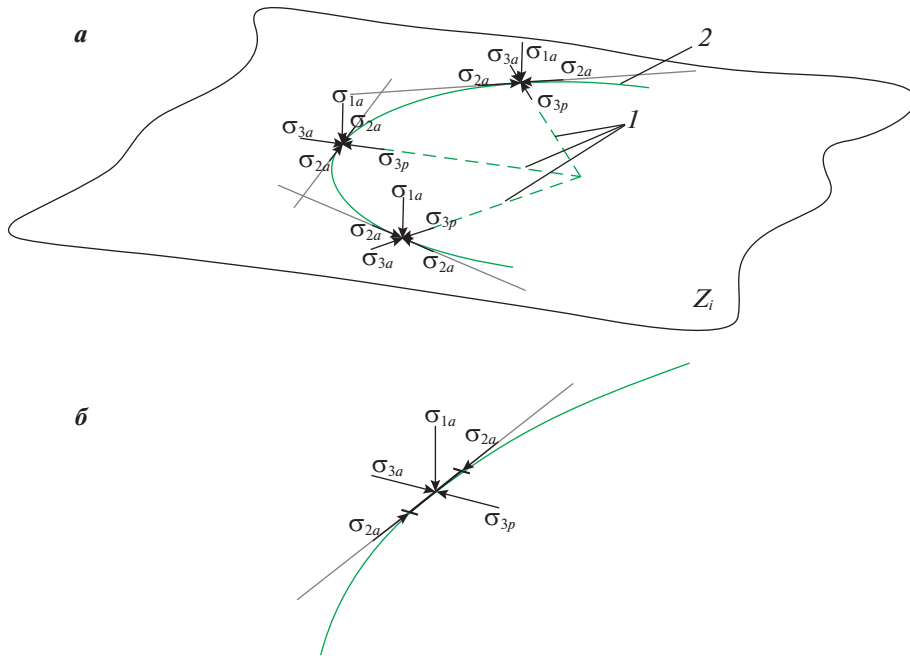


Рис. 2. Ориентация горизонтальных главных напряжений σ_2 и σ_3 по силовым и эквипотенциальным линиям на горизонте Z_i : **а** – на горизонте Z_i ; **б** – в точке (единичном отрезке кривой эквипотенциальной линии: a – зона распора (напора) по направлению к локальному силовому возмущению (разгрузке напряжений); p – зона отпора со стороны локальной разгрузки напряжений; 1 – силовые линии; 2 – эквипотенциальная линия. σ_{1a} – вертикальное наибольшее, σ_{2a} и σ_{3a} – горизонтальные соответственно среднее и наименьшее главные напряжения распора, σ_{3p} – напряжение отпора.

$$\sigma_{3ri} = m(\sigma_1 - \sigma_{str,i})(1 - 1/r_i)$$

или

$$p_i = \sigma_{3ri} = m(\gamma Z_i - \sigma_{str,i})(1 - 1/r_i), \quad (13)$$

где γZ_i – вертикальное давление в i -й точке от веса столба грунта со средним значением удельного веса γ .

Появление наименьшего и среднего главных напряжений (наибольшим главным напряжением является вертикальное $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$) связано с действием понижающего множителя $(1 - 1/r_i)$, который определяет влияние средних горизонтальных главных напряжений, действующих по концам единичного отрезка эквипотенциальной линии

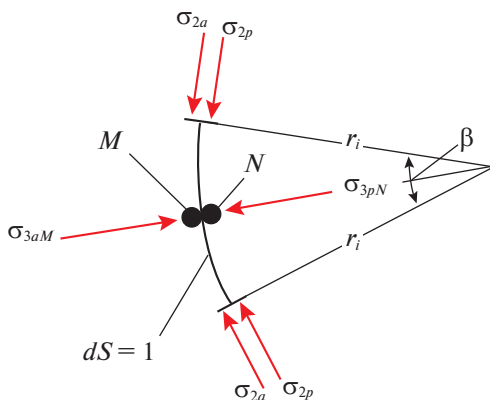


Рис. 3. Схема напряжений, действующих в точках M и N на дуге $dS = 1$ радиусом r_i (пояснения в тексте).

радиусом r_i , в i -й точке горизонта на глубине Z_i . Единичный отрезок дуги $dS = 1$ в точке M находится на силовой линии (см. рис. 3), по которой действует напряжение σ_{3aM} . В условиях сжатия горизонтальные напряжения распора σ_{2a} , действующие по концам дуги dS , уменьшают значения напряжений по силовой линии (радиусу r_i).

Здесь также состояние грунта описывается уравнением Кулона–Мора (2), в котором знаменатель представлен произведением $(\sigma_1 - \sigma_{str})(1 - 1/r_i)$, при тех же значениях $\sigma_{1,i} = \gamma Z_i$ и m (r_i по рис. 3), β – центральный угол, опирающийся на элементарный отрезок дуги в i -й точке M .

Выпуклая сторона дуги обращена в глубь массива, и в точке M формируются силы, вызванные напряжениями распора, в точке N – напряжениями отпора (со стороны зоны разгрузки напряжений).

Но в связи с уменьшением значений главных напряжений σ_{3i} (с приближением точки к бровке откоса) на каждом горизонте массива начинают боковые (горизонтальные) деформации грунта в слое на глубине Z_i в сторону центра силового возмущения. Соответственно возникают и вертикальные деформации (осадка) грунта до стабилизации состояния по достижении равенства в рассматриваемой точке:

$$\frac{\sigma_{3,i}}{\sigma_{1,i} - \sigma_{str,i}} = \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\Phi_i}{2} \right) \left(1 - \frac{1}{r_i} \right). \quad (14)$$

При этом устойчивость в точке M (см. рис. 3) сохраняется, несмотря на возникновение указанных деформаций, в соответствии с равенством напряжений распора в точке M и отпора в соседней точке N (как реакции на активное давление σ_{3aM} в точке M):

$$\sigma_{3aM} = \sigma_{3pN}. \quad (15)$$

Таким образом, в развитие теоретических решений (1) и (2) Кулона–Мора получено новое уравнение (14), характеризующее напряженно-деформированное состояние грунта в массиве на этапе допредельного развития деформаций в зависимости от степени удаления рассматриваемой точки от центра силового возмущения. На участке развития оползневой очага изменение НДС в коренном массиве (выше очага) происходит в грунтах выше горизонта существующей поверхности скольжения (базиса оползания). То есть изменение НДС осуществляется в части массива, которая находится в зоне влияния разгрузки напряжений вследствие близости к оползневому очагу. При этом верхней границей оползневой очага является стенка срыва (на откосе коренного массива). В оползневом очаге, в верхней части оползневого склона оседает блок (отделившаяся диссипативная геологическая структура [7]), под давлением которого, в соответствии с детрузивным механизмом, происходит смещение оползневой массы. В коренном массиве имеет место временное завершение процесса образования ДГС, в связи с отделением (“отторжением”) ДГС в виде нового оползневой блока.

В коренном массиве ДГС отсутствуют, и НДС представлено значениями давления распора в точках в условиях компрессионного сжатия в соответствии с законом Кулона–Мора. То есть влияние разгрузки напряжений и изменение НДС в массиве происходит в виде снижения значений давления распора от точки к точке на рассматриваемом горизонте и роста осадки в точках по мере их приближения к оползневому очагу.

Таким образом, в соответствии с представленными результатами теоретических исследований, основные закономерности изменения НДС в коренном массиве на начальном этапе проявления локального силового возмущения (разгрузки напряжений на участке склона) заключаются в следующем:

- диссипация воздействия от локального силового возмущения, в частности формирования склона и развития склоновых процессов, проявляется на НДС коренного массива посредством возникновения силовых линий, ориентации по ним напряжений распора **на каждом горизонте массива и снижении их значений с приближением к оползневому очагу (участку склона);**

- в каждой точке сохраняется равновесие (14) между активными горизонтальными напряжени-

ями – давлением распора (напора), и противодействием окружающего грунта – отпором. При этом новое уменьшенное значение распора (вследствие влияния среднего главного напряжения σ_{2ri}), связанное с ориентацией давления в точке по линиям напряженности, мобилизует по силовой линии в соседней точке равное ему значение отпора;

- отпор регламентирует изменение давления в точке массива; наибольшее его снижение происходит в зоне склона, тем более, если на склоне имеет место развитие блокового оползня.

ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ НДС КОРЕННОГО МАССИВА НА УЧАСТКЕ ПРОЯВЛЕНИЯ БЛОКОВЫХ ОПОЛЗНЕЙ

Анализ данных лабораторных испытаний. В соответствии с законом Кулона–Мора, в точке массива при вертикальном давлении на грунт, превышающем значение структурной прочности, имеет место прямая пропорциональность между напряжениями в точке.

$$\gamma Z_i = p_i / \text{tg}^2(45 - \varphi_i/2) + \sigma_{str, i}. \quad (16)$$

Если снижается давление распора p_i , то возникают деформации грунта в точке (как горизонтальные, так и вертикальные), в результате которых и формируется новое равновесие по (14). Испытания в стабилометре показывают, что при осевом напряжении $\sigma_1 > \sigma_{str}$ возникает состояние прямой пропорциональности между приращениями $\Delta\sigma_1$ и $\Delta\sigma_3$ [6], и снижение σ_3 (при $\sigma_1 = \text{const}$) вызывает осадку образца, а когда уменьшение σ_3 достигает 10–20%, происходит прогрессирующее деформирование и разрушение образца грунта [4, 9] (см. рис. 1).

В 1962 г. И.З. Лобанов провел серию испытаний среднезернистого сухого песка плотного сложения (плотность 1.8 г/см³) в специальном стабилометре, в котором нагружение образца можно было осуществлять при постоянном соотношении между главными напряжениями: вертикальным σ_1 и горизонтальным (радиальным) σ_3 [2]. Проведены испытания при соотношениях $\alpha = \sigma_1/\sigma_3$: 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3 и 4. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что осадка грунта в стабилометре существенно возрастает с увеличением α , т.е. со снижением бокового давления (рис. 4). В частности, при постоянном значении σ_1 снижение бокового давления σ_3 в 4 раза (от $\alpha = 1$ до $\alpha = 4$) приводит к уменьшению модуля деформации (в интервале $\sigma_1 = 0.05 \dots 0.6$ МПа) в 18–20 раз.

Таким образом, испытания грунтов в приборах трехосного сжатия показали, что, как это следует из закона Кулона–Мора, снижение бокового давления приводит к деформированию грунта

(в образце или в точке массива) и созданию НДС в соответствии с (14)–(16), учитывая текущее сниженное значение p_i .

Анализ результатов стендовых испытаний. В Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в 1990-х гг. были проведены исследования влияния бокового давления грунта на осадку песчаного основания штампа [1]. Опыты проводились на специальном стенде, позволяющем создавать разное начальное напряженное состояние путем изменения бокового давления при одинаковой вертикальной нагрузке $q = 0.05$ МПа. На рис. 5 представлены графики изменения осадки штампа в зависимости от коэффициента бокового давления (в песке $\sigma_{str} = 0$) при допредельной нагрузке на штамп в пределах 0.2–1.0 МПа. Из графиков видно, что со снижением бокового давления и соответственно уменьшением коэффициента бокового давления (при $q = const$) растет деформативность грунта (увеличивается осадка штампа при постоянном давлении на него, $p = const$). Это также означает, что **диссипация, связанная с локальным снижением напряжения в массиве (в данном случае уменьшения бокового давления на грунт в стенде), будет вызывать изменение НДС в прилегающих зонах (точках) массива (в грунтах в объеме стенда), которое проявляется (при сохранении исходных характеристик прочности) в повышении деформативности грунта (повышается осадка штампа).**

Действие штампа моделирует осадку сооружения, которое оказывает давление p на грунт, в условиях, когда в точках грунтового основания сооружения происходит снижение давления распора, например, вследствие влияния склона (склоновых процессов).

Результаты экспериментальных исследований изменения НДС грунтов в условиях компрессионного сжатия (в лабораторных и стендовых испытаниях) показывают, что состояние грунта в точке определяется в соответствии с законом Кулона–Мора в главных напряжениях по (1) и (2). Снижение бокового давления (давления в точке) вызывает осадку образца в приборе, или осадку штампа в стенде, определяя повышение деформативности грунта по сравнению с исходным состоянием. Указанные закономерности изменения НДС грунта проявляются при нагрузках и воздействиях на грунт, меньших предельных значений (в допредельном состоянии).

Анализ результатов натуральных наблюдений. В г. Рыбинск (Ярославская обл.) на стенах многоэтажных домов, расположенных по ул. Набережная Космонавтов и отстоящих от берега р. Волга на расстоянии 30–60 м, стали появляться трещины. В 1999–2004 гг. на одном из участков берега были проведены геодезические наблюдения за деформациями прибрежной части городской застройки с целью оценки возможного влияния на

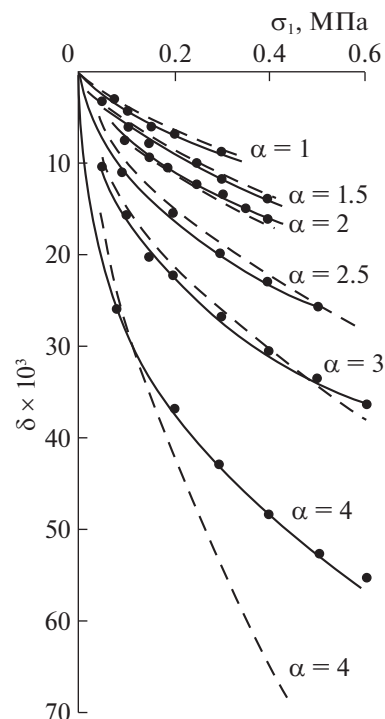


Рис. 4. Зависимость относительных деформаций δ песчаного грунта от осевых напряжений σ_1 при стабиллометрических испытаниях. Сплошные линии — замеренные значения, пунктир — расчетные по методике И.З. Лобанова [2].

указанные явления склоновых процессов [8, 10]. На рис. 6 представлены эпюры осадок краевой части плато и зданий по двум наблюдательным створам за июнь 1999 г. (4 цикла наблюдений в течение наиболее активного периода года).

Из графиков видно, что осадки реперов и марок на зданиях связаны с влиянием берегового склона. Осадки увеличиваются по мере приближения реперов к откосу массива (наибольшие значения осадки реперов, расположенных на оползневом склоне и на плато у бровки склона). Интенсивность осадок несколько выше по профилю, проходящему через оползневой участок (вблизи дома № 45).

В целом анализ результатов натуральных наблюдений свидетельствует, что влияние склона сказывается на снижении значений давления p_i в точках коренного массива на участке экспериментальных исследований, где $\gamma Z_i > \sigma_{str,i}$ (в соответствии с (10) и (13)), и на изменении НДС в массиве, вызывая осадку реперов по наблюдательным створам и неравномерную осадку грунтов в точках массива (по данным грунтовых реперов) и существующих зданий (по маркам на стенах), попадающих в зону влияния склона.

Участок склона (откоса) характеризуется уменьшением вертикального давления γZ_i в точках массива склона по сравнению с НДС на том же самом горизонте в массиве плато. Это влияние

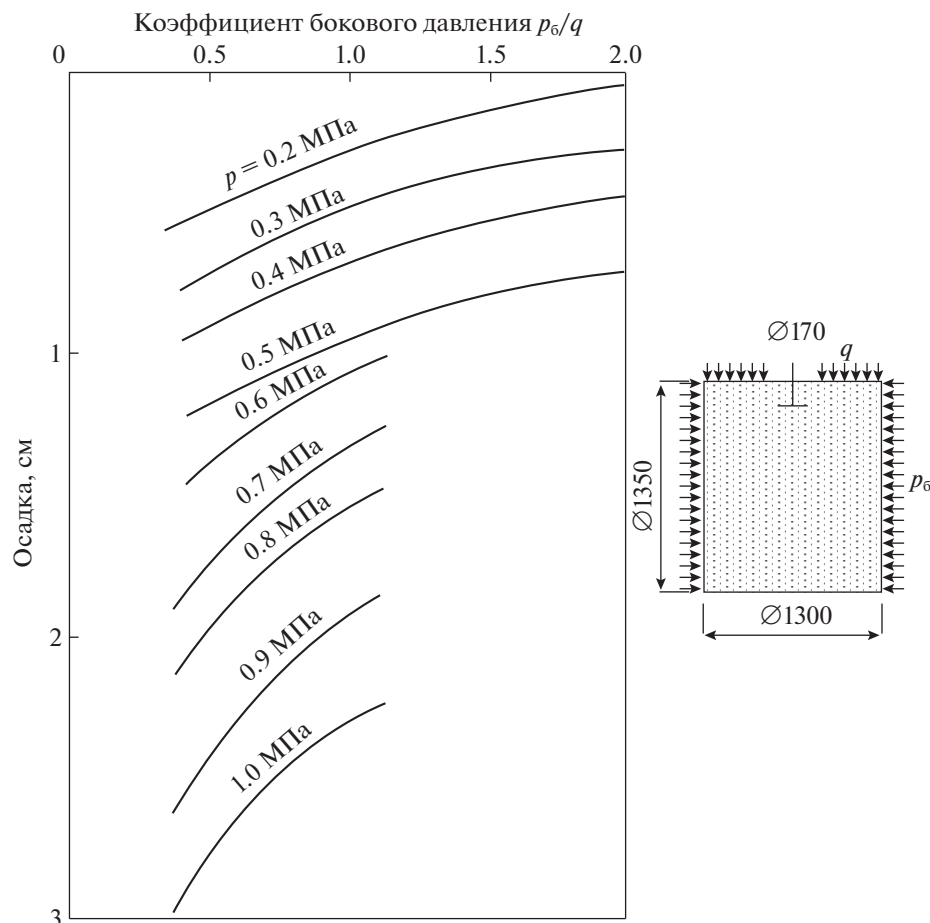


Рис. 5. Графики зависимости осадки песчаного основания штампа от изменения начального напряженного состояния (снижения бокового давления p_6) при постоянном вертикальном давлении (q) на основании и допредельной нагрузке (p) на штамп: $q = 0.05$ МПа; $p_6 = 0.0019; 0.05$ и 0.1 МПа; $p = 0.2 \dots 1.0$ МПа. Справа схематически показан в разрезе стенд, параметры стенда и штампа, давления на грунт в стенде (по материалам [1]).

склона передается от точки к точке по взаимодействию давлений распора и отпора в массиве краевой части плато. Величины осадки дневной поверхности массива плато рассматриваемого участка зависят от характеристик прочности грунта в точках ($\sigma_{str, i}$ и φ_i), глубин залегания и их удаления от бровки склона. При этом коренной грунтовый массив, воспринимающий воздействие склона, находится в устойчивом состоянии в условиях компрессионного сжатия в поле тяготения Земли с формированием НДС в точках массива по закону Кулона–Мора в главных напряжениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что уже на этапе допредельного состояния коренного массива влияние склона осуществляется как первый этап диссипации в виде изменения НДС в точках массива и возникновения в них пластических деформаций грунтов. В условиях городской застройки указанные про-

цессы могут приводить к деформациям зданий и сооружений, попадающих в зону влияния склона.

Дальнейшее развитие склоновых процессов, в частности формирование нижней границы диссипации вследствие воздействия геологического процесса (образование глубокого базиса оползания, техногенной подрезки и т.п.) может привести к возникновению диссипативных геологических структур (второй этап диссипации), подготовке предельного состояния массива и разрушительным деформациям в виде отделения оползневого блока [7].

Методы мониторинга процессов изменения НДС грунтового массива вследствие влияния близости склона и проявления диссипации, защитные мероприятия должны базироваться на выявленных закономерностях. В частности, необходимо учитывать, что влияние склонов и склоновых процессов проявляется в первую очередь как разгрузка напряжений в точках массива. Следствием этого являются деформации грунтов, распространяющиеся на десятки метров от бровки склона с захватом существующих зданий и со-

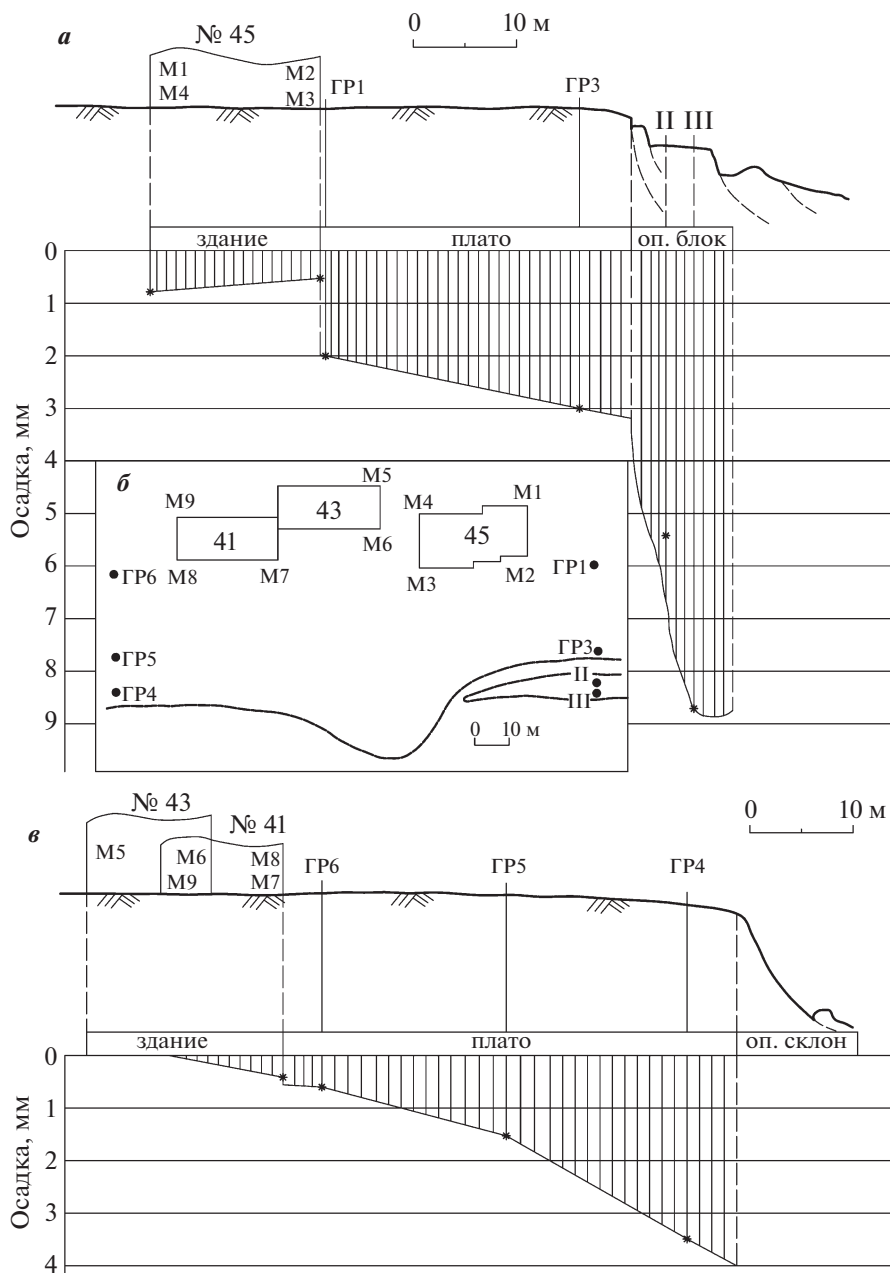


Рис. 6. Осадки по маркам на зданиях и грунтовыми реперам за июнь 1999 г. (4 цикла наблюдений, 31.05...23.06); г. Рыбинск, берег р. Волга (по материалам ГП Рыбинский комплексный отдел инженерно-строительных изысканий): *а* – профиль и эпюра деформаций у дома № 45; *б* – план схема размещения марок (M1...M8) и грунтовых реперов (GP1...GP6; II, III); *в* – профиль и эпюра деформаций у дома № 41.

оружений. Защитные мероприятия должны обеспечивать стабилизацию напряжений в точках грунтового основания зданий и в массиве краевой части плато, примыкающей к динамичному склону (откосу).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бронин В.Н., Валид И.О.* О влиянии бокового давления грунта на предельную нагрузку и осадку песчаного основания штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 3. С. 8–10.
2. *Лобанов И.З.* Влияние напряженно-деформированного состояния на деформационные характеристики песчаного грунта // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1982. № 1. С. 23–25.
3. *Ляшенко П.А.* О деформации глинистого грунта в основании фундамента // Тр. юбилейной конф., посв. 50-летию РОМГиФ. М.: РОМГиФ, 2007. Т. 2. С. 114–118.
4. *Медков Е.И.* Фазы сопротивления грунта // Механика грунтов, основания и фундаменты. Тр. МИИТа. М.: ТрансЖелдориздат, 1959. Вып. 100. С. 26–61.

5. Постоев Г.П. Закономерности гравитационного деформирования грунтовых массивов // Геоэкология. 2009. № 6. С. 534–543.
6. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кутергин В.Н. Определение консолидированных характеристик прочности грунта по испытанию на компрессионное сжатие // Геоэкология. 2018. № 3. С. 36–42.
7. Постоев Г.П., Казеев А.И., Кучуков М.М. Физические законы распределения давления в геологической среде // Геоэкология. 2020. № 6. С. 22–31.
8. Постоев Г.П., Шеко А.И., Дьяконова В.И., Парфенов С.И. О причинах деформаций зданий, расположенных в береговой полосе рек Волги и Шексны в г. Рыбинске // Геологическое изучение и использование недр. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 2001. Вып. 6. С. 22–32.
9. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Л.: Госстройиздат, 1963. 92 с.
10. Postoev G.P. The typical zones of soil deformations on slide-prone slopes // Proc. of the First Europ. conf. on Landslides, Prague, Czech Republic. Balkema, The Netherlands. 2002. P. 281–286.

COULOMB-MORE'S LAW AND THE CHANGE IN THE STRESS-STRAIN STATE OF A LANDSLIDE-PRONE MASSIF

G. P. Postoev^{a,#}, A. I. Kazeev^a, and M. M. Kuchukov^a

^a *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per. 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

[#]*E-mail: opolzen@geoenv.ru*

Stresses in points of the massif are determined and distributed according to the Coulomb-More law in the main stresses, under the conditions of compression. Influence of slope and development of slope processes causes in massif, according to dissipation processes, decrease of stresses in points. The results of experimental studies (laboratory, bench and in-situ) indicate that the regular processes of stress reduction in the points of the massif cause deformation of soils already at a pre-limit stage (for the massif). But they can cause the formation of cracks in the bearing structures of buildings and the appearance of dangerous unequal subsidence of their foundations.

Keywords: *Coulomb-More law, stress-strain state, dissipation, lateral expansion, stress reduction, laboratory, bench and field tests, slope processes, massif subsidence*

REFERENCES

1. Bronin, V.N., Valid, I.O. *O vliyaniy bokovogo davleniya grunta na predel'nyuyu nagruzku i osadku peschanogo osnovaniya shtampa* [The impact of lateral pressure on the limit load and settlement of sandy foundation of stamp]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1992, no. 3, pp. 8–10 (in Russian).
2. Lobanov, I.Z. *Vliyaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya na deformatsionnye kharakteristiki peschanogo grunta* [The influence of stress-strain state on deformation parameters of sandy soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 1982, no. 1, pp. 23–25. (in Russian)
3. Lyashenko, P.A. *O deformatsii glinistogo grunta v osnovanii fundamenta* [About deformation of clayey soil in the basement foundation]. Proc. The jubilee conference dedicated to the 50th anniversary of the Russian society of soil mechanics, geotechnics and foundation engineering. Moscow, ROMGGiF Publ., 2007, vol. 2, pp. 114–118. (in Russian)
4. Medkov, E.I. *Fazy soprotivleniya grunta* [Phases of soil resistance]. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty* [Soil mechanics and foundation engineering]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1959, issue 100, pp. 26–61. (in Russian)
5. Postoev, G.P. *Zakonomernosti gravitatsionnogo deformirovaniya gruntovykh massivov* [Regularities in gravitational deformation of ground massifs]. *Geoekologiya*, 2009. no. 6, pp. 534–543. (in Russian)
6. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kutergin, V.N. *Opredele-nie konsolidirovannykh kharakteristik prochnosti grunta po ispytaniyu na kompressionnoe szhatie* [Soil strength parameters determined by compression test]. *Geoekologiya*, 2018, no. 3, pp. 36–42. (in Russian)
7. Postoev, G.P., Kazeev, A.I., Kuchukov, M.M. *Fizicheskie zakony raspredeleniya davleniya v geologicheskoi srede* [Physical laws of stress distribution in geoenvironment]. *Geoekologiya*, 2020, no. 6, pp. 22–31. (in Russian)
8. Postoev, G.P., Sheko, A.I., D'yakonova, V.I., Parfenov, S.I. *O prichinakh deformatsii zdaniy, raspolozhennykh v beregovoi polose rek Volgi i Sheksny v g. Rybinske* [About the causes of deformation of buildings on the banks of Volga and Sheksna rivers in the town of Rybinsk]. *Geologicheskoe izuchenie i ispol'zovanie neдр* [Geological study and the use of bowels]. Moscow, ЗАО “Геоинформмарк” Publ., 2001, issue 6, pp. 22–32. (in Russian)
9. Sipidin, V.P., Sidorov, N.N. *Issledovanie gruntov v usloviyakh trekhosnogo szhatiya* [Investigation of soils and rocks by triaxial compression test]. Leningrad, Gosstroizdat Publ., 1963, 92 p. (in Russian)
10. Postoev, G.P. The typical zones of soil deformations on slide-prone slopes. Proc. of the first Europ. conf. on landslides, Prague, Czech Republic, June 24–26, 2002. P. 281–286. Balkema, the Netherlands, 2002.