

УДК 624.131.4

UDC 624.131.4

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА**DEFORMATION MODEL OF SAND MICROSTRUCTURE**

Ляшенко Павел Алексеевич
к. т. н., доцент
SPIN-код 5503-9110
E-mail: lyseich1@yandex.ru

Lyashenko Pawel Alekseevich
Cand. Tech. Sci., associate Professor
SPIN-code 5503-9110
E-mail: lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

Denisenko Viktor Viktorovich

к. т. н., доцент
SPIN-код 8558-4247

Cand. Tech. Sci., associate Professor
SPIN-code 8558-4247

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Kuban State Technologic University, Krasnodar, Russia

E-mail: devivi@kubstu.ru

E-mail: devivi@kubstu.ru

Предлагается модель деформации песчаного грунта, учитывающая образование кластеров частиц, и метод измерения ее характеристик. Физической основой модели является эффект ступенчатого увеличения осадки пробы песка при компрессионном сжатии ее постоянно возрастающим давлением и непрерывном измерении деформации. Анализ осадки и скорости осадки пробы позволил построить двухпорядковую микроструктурную модель деформации песка, определить ее характеристики, а также вычислить по ним феноменологические характеристики: угол внутреннего трения и модуль деформации. Согласно предложенной модели, при компрессионном сжатии пробы уплотнение песка происходит вследствие локальных сдвигов на поверхностях скольжения, которые развиваются от жестких штампов вглубь пробы. Поверхности скольжения выделяют кластеры песка, и моменты выделения слоев кластеров регистрируются прибором в виде скачков деформации. Формирование слоев кластеров инициируется жесткими штампами через наиболее крупные минеральные зерна. Слои кластеров создают несимметричную микроструктуру пробы песка, ее уплотнение неоднородно и анизотропно. На начальном интервале значений давления происходит образование первичных кластеров, а после того, как они охватят весь объем пробы, уплотнение песка идет за счет их дробления на вторичные кластеры меньших размеров. Момент смены механизма уплотнения проявляется в резком снижении скорости осадки. Процесс уплотнения продолжается так же, со ступенчатым увеличением осадки, но при большем приращении давления на каждой ступени. Модель деформации позволяет вычислить значение давления, при котором уплотнение песка достигает теоретического предела

The deformation model of sand soil that takes into account the formation of clusters of particles, and method of measuring its characteristics is suggested. The physical basis of the method is the effect of the stepwise increasing of the sand probe at the odometer pressure by the constant rate of loading and the continuous measuring of deformation. The analysis of settlement and its rate has been allowed to determine the microstructural characteristics of the two-order deformation model of sand. According to the proposed model, with compression of the probe in odometer compaction of the sand takes place due to local strains on the sliding surfaces. The sliding surfaces allocate clusters of sand, and the separated layers of clusters are registered by device in the form of steps of deformation. Layer formation of clusters is initiated by the rigid stamps through the largest mineral grains. Cluster layers create the asymmetric microstructure of the sand probe, its compaction is non uniform but also anisotropic. At the initial interval value of the pressure, the formation of primary clusters occurs, and once they cover the entire probe volume, the compaction of the sand is by crushing them on the secondary smaller cluster sizes. The change of mechanism of the compaction is manifested in the sharp decrease of the settlement rate. The compaction process continues while a larger increment of pressure at each step. The deformation model allows compute the pressure value at which the compaction of the sand reaches the theoretical limit

Ключевые слова: МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ, УПЛОТНЕНИЕ, ОСАДКА, СКОРОСТЬ ОСАДКИ, КЛАСТЕР ЧАСТИЦ, ХАРАКТЕРИСТИКИ МИК-

Keywords: DEFORMATION MODEL, COMPRESSION, SETTLEMENT, RATE OF SETTLEMENT, CLUSTER OF PARTICLES,

ВВЕДЕНИЕ

Сопротивление песчаных грунтов внешней нагрузке описывается в современной механике грунтов разными теориями: сплошного деформируемого тела, предельного равновесия, на основе дискретных моделей [1, 8, 9]. Каждая из них представляет одну сторону механического поведения грунта, ограниченную рамками принятой модели. Несмотря на большую глубину и высокую тщательность разработки этих теорий, они не дают достаточного понимания комплекса всех процессов и некоторых особенностей сопротивления и деформаций грунтового тела. Они не отражают неоднородности уплотнения грунта при всестороннем сжатии, нарушения устойчивости частей грунтового тела при сохранении его как целого, развития разрушения во времени и в пространстве, не объясняют явления сцепления упрочнения.

Определенные опытным путем показатели сжимаемости и прочности носят феноменологический характер и зависят от условий испытания. Учитывая, что метод испытания часто определяется доступностью грунта в массиве и не моделирует работу грунта в основании сооружения, применение получаемых числовых показателей при расчете сопротивления и деформации основания фундамента трудно обосновать корректно.

Деформации песчаного грунт описываются методами механики сплошных сред, а его прочность определяется внутренним трением, сформулированным Ш. Кулоном по аналогии с внешним трением зацепления. Противоречие между этими подходами состоит в том, что деформации грунта сопровождаются локальными разрушениями, а прочность определяется развитием микродеформаций. В рамках феноменологических теорий это противоречие неразрешимо. Разрешить его можно только на ином

уровне рассмотрения явлений, а именно, на уровне микроструктуры грунта.

1 ПРЕДПОСЫЛКИ К ОБОСНОВАНИЮ МОДЕЛИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА

1.1 Моделирование песка сплошной средой

Песчаный грунт состоит из частиц разных размеров и форм [1], взаимодействующих посредством сжимающих сил и сил трения, возникающих на контактах между ними. Силы трения значительно меньше межкристаллических сил, действующих внутри частиц, поэтому деформации песчаного тела определяются силами трения скольжения и качения частиц внутри него. Если размеры частиц намного меньше песчаного тела, то распределение в нем этих сил можно рассматривать как в сплошной среде. «С физической точки зрения, использование модели сплошной среды оправдано, если наименьший из рассматриваемых в процессе исследования объемов материала сохраняет «представительность» его механических свойств как интегрального эффекта взаимодействия многих микрочастиц, т. е. должно выполняться неравенство

$$\sqrt[3]{\Delta V} \gg d_M, \quad (1)$$

где ΔV – малый объем материала, а d_M – характерный размер микроструктуры (например, для грунтов – это диаметр зерен, пор)» [8].

Некоторые признаки указывают на то, что этим объемом может быть агрегация зерен, перемещающаяся при деформациях грунта как целое и взаимодействующая с другими агрегациями [8, 11,12, 14] как кластер. Тогда объем в левой части (1) – объем кластера – будет намного меньше, чем объем грунтового тела. Кластер выступит как промежуточный элемент между частицами и грунтовым телом.

1.2 Моделирование песка дискретной средой

В сухом и полностью водонасыщенном песке взаимодействие между частицами осуществляется контактными силами, которые, как известно [1, 8], имеют тангенциальную составляющую τ , силу трения, и V , нормальную к поверхности частиц в месте контакта. Соотношение между ними определяется коэффициентом трения δ , зависящим от состояния поверхности в месте контакта и материала частиц [8]:

$$\tau \leq \delta V, \quad (2)$$

В предельном состоянии в формуле (1) принимают знак равенства. Предельное состояние наступает в тех точках и на тех площадках в грунтовом теле, где максимальные касательные напряжения достигают значения

$$\tau_{\max} = \tau_{\lim}. \quad (3)$$

По-видимому, на границах кластеров действует условие равенства в уравнении (2), а внутри – неравенства. Однако оценить размеры кластеров в зависимости от физических характеристик песка пока не удавалось. Представляется, что для этого необходима общая концепция деформации и разрушения, основанная на наблюдаемых свойствах реальных грунтов. Например, концепция должна учитывать большое разнообразие размеров частиц и пор и, главное, единство деформаций и разрушения.

Ниже предлагается модель деформации, учитывающая образование кластеров, и метод измерения ее характеристик.

1.3 Уплотнение песка в условиях компрессионного сжатия

Опыты с компрессионным сжатием песка проводились нами при постоянно возрастающем давлении и непрерывном измерении осевой деформации. Поддержание постоянной скорости увеличения давления производилось автоматически в компрессионном приборе АКП-4Н конструкции В. В. Денисенко. Скорость задавалась в диапазоне 1,67...4,83 кПа/мин. Ре-

гистрации значений давления и осадки производились синхронно с шагом 0,005 мм осадки, что позволило подробно проследить изменение осадки с увеличением давления [5, 6, 13, 14]. Конечное значение давления задавалось от 300 до 870 кПа.

Полученные данные показали, что осадка пробы песка развивается нелинейно и неравномерно, а при малом шаге регистрации данных видно, что осадка увеличивается ступенчато (рисунок 1). Увидеть неравномерность более отчетливо позволяет численное дифференцирование записи осадки по давлению:

$$\frac{\Delta s}{\Delta \sigma} = f(\sigma), \quad (4)$$

где s – осадка пробы песка в компрессионном приборе; σ – осевое давление на пробу, изменяющееся со временем по линейному закону: $\sigma = B_p t$; t – время с начала нагружения; B_p – постоянная скорость нагружения; $f(\sigma)$ – «скорость» осадки пробы. Хотя слово «скорость» взято в кавычки, так как имеет размерность мм/кПа, но по существу, действительно отражает скорость изменения осадки. Можно записать (4) в форме

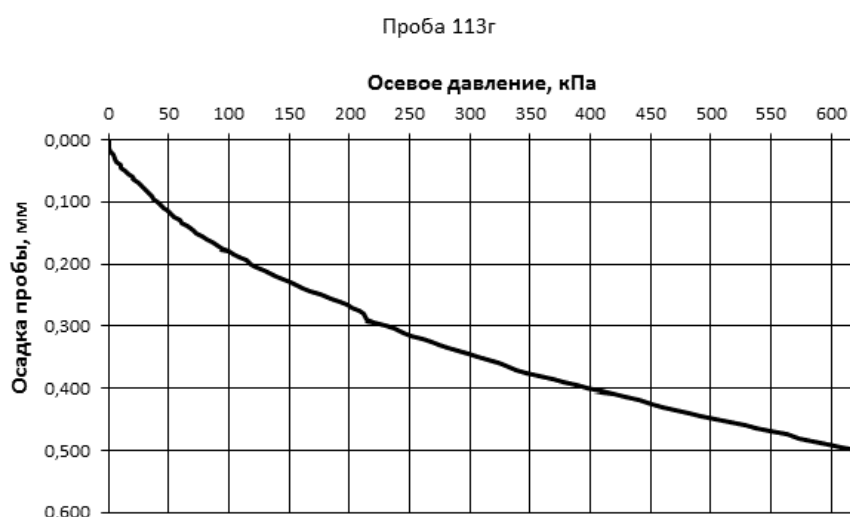


Рисунок 1 – Осадку пробы песка при компрессионном сжатии

$\frac{\Delta s}{B_p \Delta t} = f(\sigma)$, откуда видно, что действительная скорость осадки $\Delta s / \Delta t$

пропорциональна функции $f(\sigma)$:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = B_p f(\sigma). \quad (5)$$

«Скорость» осадки изменяется циклически с увеличением давления на пробу песка (рисунок 2). С началом нагружения «скорость» осадки велика и характеризуется примерно постоянным значением. При некотором давлении $\sigma = \sigma_{s.s}$, средняя «скорость» \bar{f} резко падает, затем монотонно уменьшается, по мере роста давления $\sigma > \sigma_{s.s}$. Отдельные значения «скорости» сильно отличаются от среднего, но их доля в общем числе циклов мала, и они не влияют на отмеченную выше тенденцию к снижению средней «скорости». Поскольку указанные отличия проявляются во всех испытанных пробах песков, используем «скорость» осадки для анализа данных опыта.

Испытаны пробы мелкого песка в сухом и водонасыщенном состоянии, а также пробы, состоящие из мелкого песка и порошка глины – по пять проб каждого вида. Мелкий песок имел фракционный состав (2,0–1,0) : (0,25–0,10) = 1 : 1, где в правой части равенства указано отношение масс фракций. Фракционный состав песка с глинопорошком (2,0–1,0) : (0,25–0,10) : (<0,01) = 0,5 : 0,5 : 1.



Рисунок 2 – «Скорость» осадки пробы песка при компрессионном сжатии

Рассмотрим амплитудные значения «скорости» осадки: максимальное f_{\max} и минимальное f_{\min} . В целом по всем циклам $f_{\min} < f_{\max}$. Их средние значения \bar{f}_{\max} и \bar{f}_{\min} в начальном интервале $\sigma_o < \sigma \leq \sigma_{s.s}$ больше, чем в интервале $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$ (таблица 1). Причем в пределах начального интервала средние значения \bar{f}_{\max} и \bar{f}_{\min} не проявляют зависимости от давления. В интервале $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$ они уменьшаются с увеличением давления.

Очевидно, что существует качественное отличие реакции сжимаемого песка в этих интервалах. Значение $\sigma_{s.s}$ является рубежным значением давления, отделяющим механизмы сжатия песка в этих двух интервалах. Первый из них назовем «начальным интервалом», второй – «интервалом уплотнения песка». Начальный интервал будем отсчитывать от значения $\sigma = \sigma_o$, до которого по первичным данным опыта заметно влияние неровностей пробы на значения осадки.

С увеличением внешнего давления значения обеих величин уменьшаются, в целом сближаясь.

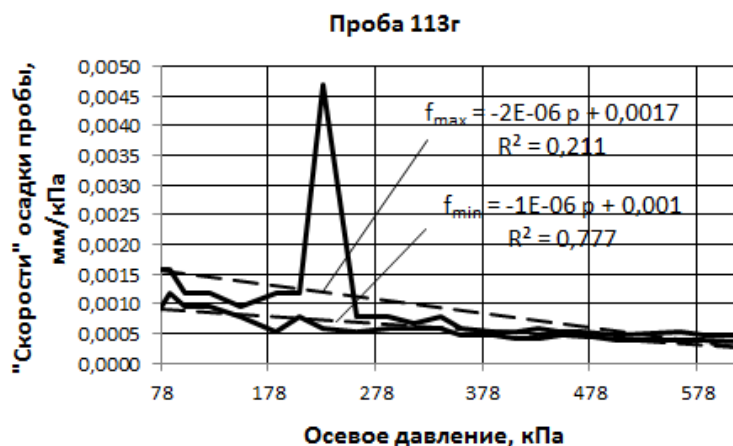


Рисунок 3 – Аппроксимация амплитудных значений «скорости» осадки пробы песка при $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$

Если аппроксимировать их линейными функциями давления, то можно рассчитать значение давления $\sigma = p_u$, при котором эти величины предположительно сравняются, т. е.

$$f_{min}(p_u) = f_{max}(p_u). \tag{6}$$

Например, для пробы 113г $p_u = 500$ кПа (рисунок 3).

Цикл изменения «скорости» осадки представим схематично состоящим из двух ветвей, аппроксимированных отрезками прямых между точками с координатами f_{max} и f_{max} . Единичный цикл состоит из восходящей и нисходящей ветвей (рисунок 4, верхняя схема). На восходящей ветви осадка растет быстрее, на нисходящей – медленнее (рисунок 4, нижняя схема).

Обозначим длину восходящей ветви как Δp_r , нисходящей – как Δp_e . Соответствующие приращения осадки обозначим Δs_r и Δs_e . Длины ветвей циклов мало отличаются на начальном интервале давления, а в интервале уплотнения значения Δp_r заметно больше, чем Δp_e : на 10...23 % (таблицы 1 и 2).

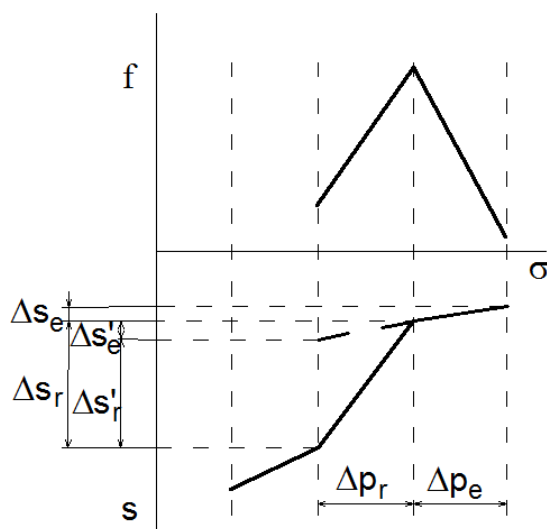


Рисунок 4 – Схема цикла изменения «скорости» осадки

Приращения осадки пробы на восходящей ветви цикла в обоих интервалах больше, чем на нисходящей (таблицы 1 и 2).

ТАБЛИЦА 1 – СРЕДНИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРОБ В НАЧАЛЬНОМ ИНТЕРВАЛЕ

| $\sigma_o < \sigma \leq \sigma_{s.s}$ | | | | | |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| Δs_e | Δs_r | Δp_e | Δp_r | f_{min} | f_{max} |
| мм | мм | кПа | кПа | мм/кПа | мм/кПа |
| Сухой песок | | | | | |
| 5,91E-03 | 8,51E-03 | 5,34 | 5,02 | 0,0011 | 0,0023 |
| Водонасыщенный песок | | | | | |
| 5,78E-03 | 7,56E-03 | 3,20 | 3,09 | 0,0017 | 0,0027 |
| Сухой песок с глинопорошком | | | | | |
| 5,35E-03 | 1,03E-02 | 0,89 | 1,04 | 0,0072 | 0,0153 |

ТАБЛИЦА 2 – СРЕДНИЕ ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРОБ В ИНТЕРВАЛЕ УПЛОТНЕНИЯ ПЕСКА

| $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$ | | | | | |
|---|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
| Δs_e | Δs_r | Δp_e | Δp_r | f_{min} | f_{max} |
| мм | мм | кПа | кПа | мм/кПа | мм/кПа |
| Сухой песок | | | | | |
| 6,00E-03 | 8,59E-03 | 12,06 | 14,11 | 0,0005 | 0,0008 |
| Водонасыщенный песок | | | | | |
| 6,17E-03 | 8,98E-03 | 7,34 | 8,14 | 0,0009 | 0,0013 |
| Сухой песок с глинопорошком | | | | | |
| 5,84E-03 | 9,11E-03 | 2,60 | 2,85 | 0,0032 | 0,0052 |

2 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА

«Известно, что песок может уплотняться как под давлением, так и при сдвигах... Уплотнение идет интенсивно уже при малых сжимающих напряжениях – порядка 0,1–0,2 кг/см². С ростом сжимающих напряжений быстро возрастает «жесткость» песка» [1]. Испытания песчаного грунта штампом показали, что «малым и конечным деформациям соответствуют различные механизмы деформирования песчаного основания». Сдвиговая

деформация локализуется в пределах узкой полосы, которая является предположительно «тонким материальным слоем, деформирующимся в предельном состоянии однородно» [15].

Циклическое изменение «скорости» осадки отражает, как и в глинистых грунтах [3, 4, 10, 11, 14], особенности деформации песков при сжатии. Они заключаются в том, что помимо движений отдельных частиц песка, в деформации пробы участвуют их объединения, кластеры, создающие кооперативный эффект сопротивления внешней нагрузке. Движения кластеров, имеющих размеры, намного бóльшие, чем размеры частиц, – регистрируются прибором как макроскопические деформации. Ступенчатое увеличение осадки при плавно возрастающей нагрузке и есть проявление кооперативного эффекта. Оно положено нами в основу микроструктурной модели деформации песка. Числовые характеристики модели примем из параметров компрессионного сжатия песка при постоянно возрастающем давлении на пробу. Кроме давления и осадки в опыте доступны измерению параметры циклов изменения «скорости» деформации.

2.1 Модель площадки скольжения

Уплотнение и сдвиг нельзя рассматривать отдельно. Уплотнение происходит за счет локальных сдвигов [1, 16]. Рассматривая действие давления, авторы [1, 8, 9] логично видят реакцию песка в виде взаимного скольжения частиц (смоделированных круговыми дисками). Действительно, симметричная схема Лэмба неустойчива, и нарушение «ближнего порядка» сложения частиц выразится сдвигом по площадкам скольжения. Сдвиг вызывает уплотнение песка вблизи площадки скольжения, образование «тонкого материального слоя» [2, 15].

Рассмотрим образование площадок скольжения. Исходными предположениями модели примем следующие:

1) песчаный грунт неоднороден и содержит разные по размерам частицы и поры, среди которых выделим мелкозем и наиболее крупные ча-

стицы, или минеральные зерна (НКЗ), а также наиболее крупные поры (НКП), как концентраторы напряжений;

2) деформация песчаного тела представляет собой перемещение групп частиц (кластеров) по поверхностям максимальных касательных напряжений, достигших предельных значений, т. е. отвечающих условию (3).

Деформация Δs_e на нисходящей ветви цикла отражает сжатие мелкозема во всей пробе. «Скорость» деформации мала вследствие быстрого нарастания сопротивления при уплотнении с перемещением частиц на малых расстояниях.

На восходящей ветви цикла происходит смещение групп контактирующих частиц вдоль поверхности максимальных касательных напряжений Ω (рисунок 5). Для них условие (3) выполняется, прежде всего, на контактах мелких частиц («мелкозема») вокруг НКП, попадающих на поверхность максимальных касательных напряжений Ω ($\tau_{\max} = const$). НКП при этом закрываются, обеспечивая тем самым кинематические условия смещения по поверхности Ω и образование площадки скольжения. След площадки обозначен отрезком АС на рисунке 5, закрывшиеся на ней НКП обозначены короткими жирными отрезками на АС.

Площадки скольжения одновременно образуются в слое пробы с одинаковым по слою напряженно-деформированным состоянием.

Развитию смещения частиц мелкозема препятствуют НКЗ, лежащие на Ω , поэтому поверхность смещения огибает НКЗ по линии СG, после чего она вновь может следовать направлению Ω , но уже в следующем слое. Обобщенно, по нескольким слоям, поверхность скольжения можно рассматривать как следующую направлению ω , отклоняющегося от Ω на угол δ .

Полное смещение по поверхности ω за один цикл деформации выразим формулой:

$$\Delta s'_r = \frac{(k_{3s} - 1)L_{3s}}{\sqrt{2}} + \frac{L_{4s} L_{3s} \sqrt{2}}{2M_{3s}}, \quad (7)$$

где $\Delta s'_r$ – часть деформации пробы на восходящей ветви цикла, обусловленная развитием поверхностей скольжения по НКП, лежащим на поверхностях максимальных касательных напряжений (рисунок 4); k_{3s} – среднее число НКП между НКЗ. L_{3s} – средний размер НКП; L_{4s} – средний размер НКЗ; M_{3s} – среднее расстояние между НКП (рисунок 5);

$$M_{3s} = \frac{1}{k_{3s}} \left(M_{4s} - \frac{L_{4s}}{2} \right). \quad (8)$$

где M_{4s} – среднее расстояние между НКЗ.

Другая часть деформации на восходящей ветви цикла $\Delta s'_e$ обусловлена уплотнением мелкозема, прилегающего к поверхности ω , происходящего одновременно с деформацией скольжения. Ее можно вычислить исходя из предположения об однородном уплотнении всей пробы, содержащей площадку скольжения АС только в одном слое.

$$\Delta s_r = \Delta s'_r + \Delta s'_e. \quad (9)$$

Из рисунка 4 ясно, что

$$\Delta s'_e = \Delta s_e \frac{\Delta p_r}{\Delta p_e} \quad (10)$$

и

$$\Delta s'_r = \Delta s_r - \Delta s'_e. \quad (11)$$

Для оценки уплотнения одного слоя пробы при образовании площадок скольжения введем коэффициент уплотнения мелкозема:

$$m_e = \frac{\Delta s_r}{\Delta s'_e}. \quad (12)$$

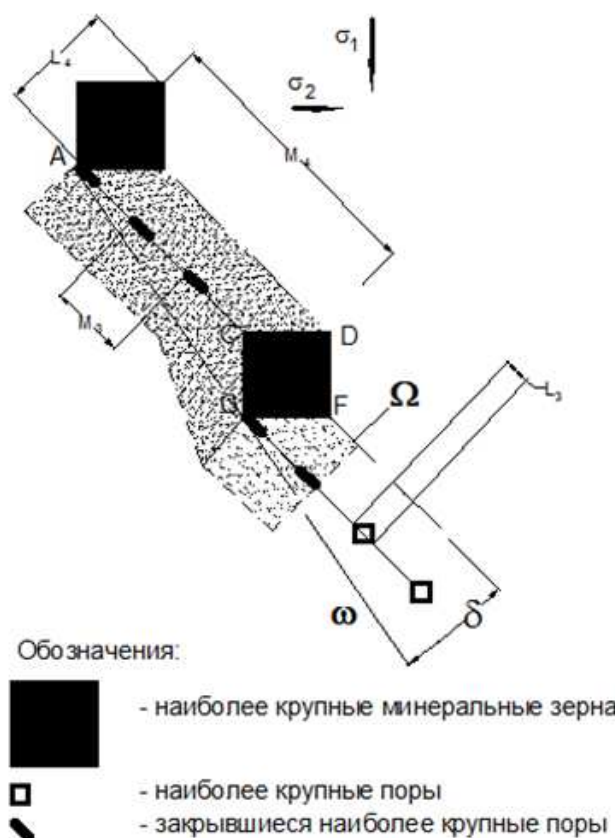


Рисунок 5 – Схема деформации и разрушения песка на поверхности скольжения

Теперь относительную деформацию сжатия пробы песка в цикле деформации можно выразить уравнением:

$$\frac{2(\Delta s_e + \Delta s'_e)}{H_s} = \frac{L_{3s}(k_{3s} - 1)}{m_e M_{4s}}, \quad (13)$$

где H_s – высота пробы песка.

Уравнения (7), (8), (12), (13) связывают с граничными перемещениями пробы песка пять неизвестных характеристик микроструктуры. Необходимое шестое уравнение получим из рассмотрения модели деформации пробы, в целом.

2.2 Морфологическая модель деформации пробы песка

По мере увеличения внешнего давления, поверхности скольжения развиваются от торцов пробы вглубь, с постоянным по длине шагом, до

слияния поверхностей скольжения, идущих от противоположных торцов. Это позволяет определить момент слияния поверхностей скольжения по изменению скорости осадки.

Как было сказано выше, «скорость» осадки сохраняется на начальном интервале нагружения $\sigma_o < \sigma \leq \sigma_{s.s}$ сохраняется на определенном уровне относительно стабильно. Это свидетельствует об однородном механизме деформации в начальном интервале, а в свете построения модели площадки скольжения, – о приращении поверхностей скольжения на одинаковую величину, равную длине площадки скольжения (рисунок 6). Эти приращения идут от НКЗ на торцах пробы до НКЗ внутри ее, до слияния поверхностей скольжения, идущих от противоположных торцов (рисунок 7). «Скорость» осадки пробы после слияния она резко падает, а далее уменьшается плавно, по мере возрастания давления на пробу (рисунок 2).

Длину приращений поверхностей скольжений можно рассчитать, разделив путь, пройденный ими до слияния, на число циклов деформации в интервале $\sigma_o < \sigma \leq \sigma_{s.s}$, по формуле:

$$M_{4s} = \frac{H_s}{(n_c - n_o)\sqrt{2}} \cdot \quad (14)$$

где n_c – число циклов деформации пробы, сохраняющих в начале нагружения постоянное высокое значение f_{max} ; n_o – число первых циклов, имеющих признаки влияния неровностей пробы на результаты опыта, т. е. до значения $\sigma = \sigma_o$.

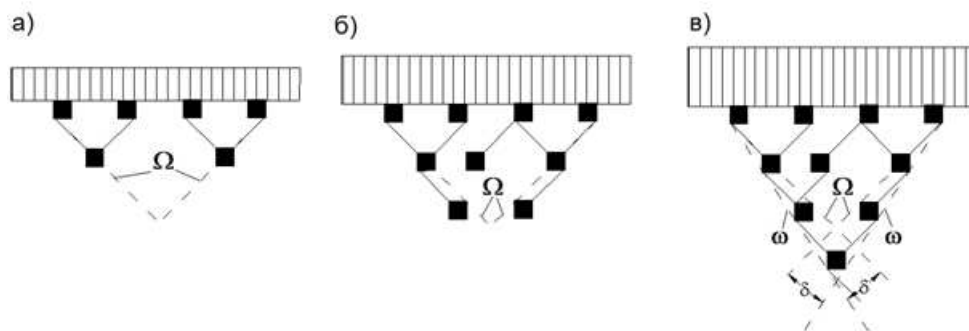


Рисунок 6 – Схема формирования поверхностей скольжения из локальных площадок скольжения

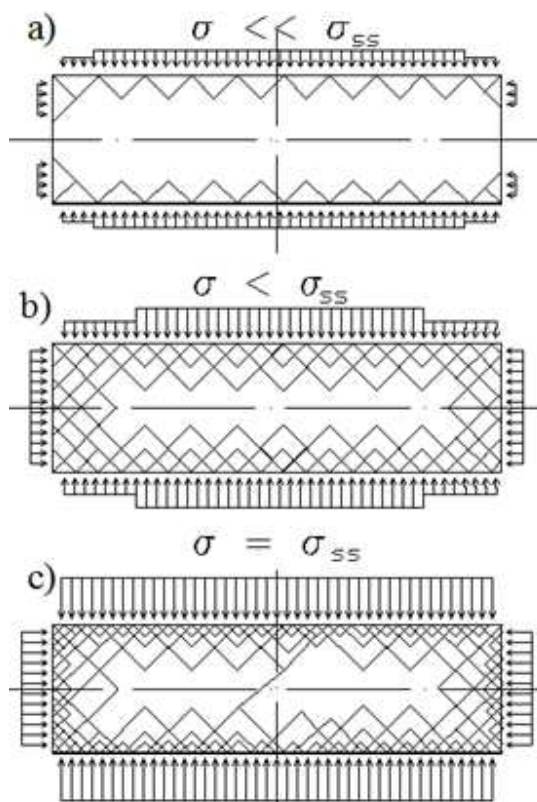


Рисунок 7 – Схема развития поверхностей скольжения при компрессионном сжатии пробы песка до их слияния внутри пробы

Система уравнений (7), (8), (12), (13) и (14) становится разрешимой. Значения характеристик приведены в таблице 3. Видно, что модельные размеры НКЗ в водонасыщенном песке меньше, чем в сухом, а шаг НКП в водонасыщенном песке, напротив, больше, чем в сухом. Модельный размер НКП одинаков в обоих случаях. Модельные размеры в сухом песке с глинопорошком сильно отличаются от таковых в песке без глинопорошка: значения M_{s4} и L_{s4} – в меньшую сторону, а значения M_{s3} и L_{s3} – в большую. По-видимому, проявляется способность глинистых частиц к агрегатированию мелкозема и к снижению внутреннего трения между более крупными частицами песка.

Оба эти качества способствуют образованию кластеров, ограниченных площадками скольжения (рисунок 8).

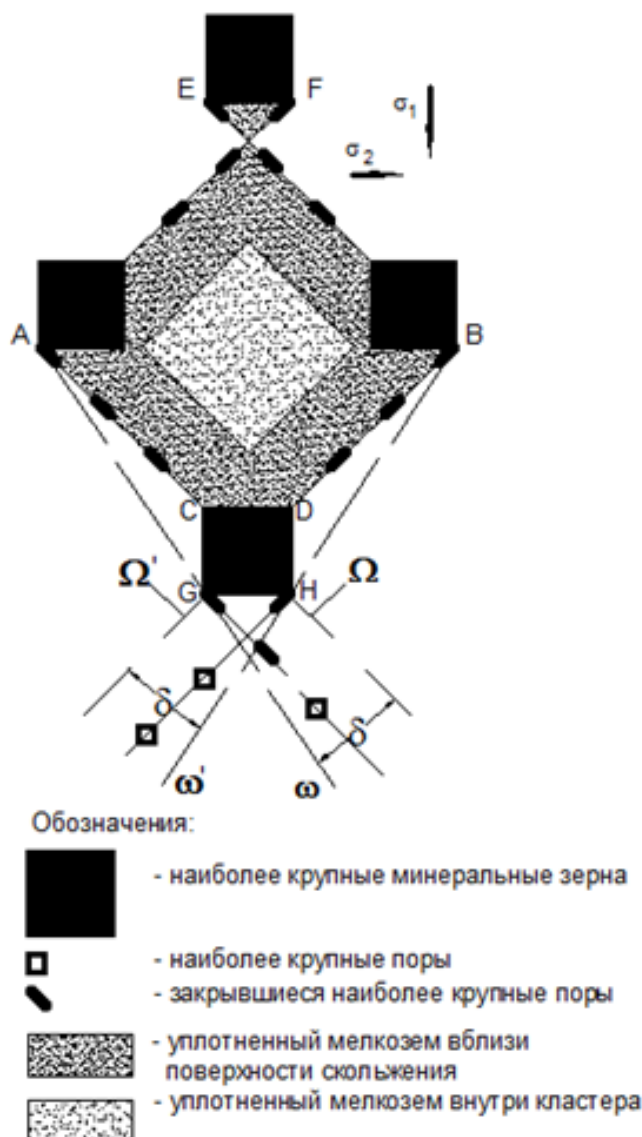


Рисунок 8 – Схема образования поверхностей скольжения и выделения песчаного кластера

Существование таких кластеров доказано в опытах на модели гранулированного материала в виде дисков из оргстекла, целью которых было изучение распределение усилий между дисками. При достижении предельного состояния группы дисков образовали объединения, макродиски или кластеры, перемещавшиеся как одно целое при деформации границ модели [9]. Предполагается, что в песке действует «сцепление упрочнения» [7], вызывающее агрегатирование мелкозема, что подтверждается

уменьшением значений M_{s4} и L_{s4} в песке с глинопорошком в наших опытах.

Внутри кластера касательные напряжения меньше предельного значения. Перемещения кластера больше, чем перемещения отдельных частиц и их микроагрегатов, поэтому доступны для измерений в макроскопическом опыте.

Компрессионное сжатие постоянно возрастающим давлением предоставляет хорошую возможность проследить этот процесс как в песках, так и в глинистых грунтах [11, 12]. Поскольку проба песка сжимается действием жесткого штампа с плоской подошвой, то можно представить, что кластеры частиц зарождаются одновременно в разных местах пробы, сходных по напряженно-деформированному состоянию, а именно там, где максимальные касательные напряжения достигают предельного значения. Сначала они возникают вблизи нагруженной границы пробы, затем процесс распространяется вглубь нее постепенно, по мере роста внешнего давления. При этом сами кластеры, состоящие из мелких частиц (мелкозема) уплотняются, их взаимное смещение приводит к общему уплотнению песка.

Форма кластеров зависит от формы нагруженной границы грунтового тела. Известно, что плоская граница порождает площадки скольжения, направленные под углом $(\pi/4 - \varphi/2)$ к нормали [16], где φ – угол внутреннего трения грунта. При плоской деформации кластеры объединяются в гиперкластеры («бруски» [7]), вытянутые в направлении, параллельном плоскости жестких конструкций, действующих на песок (рисунок 9).

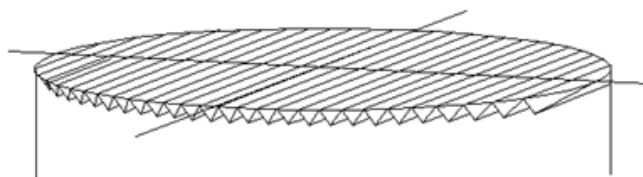


Рисунок 9 – Схема 1-го слоя гиперкластеров в пробе песка

при его компрессионном сжатии

ТАБЛИЦА 3 – СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ ПЕСКА

| M_{s4} | L_{s4} | M_{s3} | L_{s3} | m_e |
|-------------------------------|----------|----------|----------|-------|
| м | м | м | м | |
| Сухой песок | | | | |
| 1,98E-03 | 1,68E-03 | 2,25E-05 | 2,80E-07 | 1,7 |
| Водонасыщенный песок | | | | |
| 1,84E-03 | 1,49E-03 | 3,60E-05 | 2,80E-07 | 1,5 |
| Сухой песок с глинопопорошком | | | | |
| 6,81E-04 | 4,73E-04 | 9,53E-05 | 1,89E-06 | 1,8 |

2.3 Динамическая модель деформации микроструктуры песка

Построение динамической модели деформации основано также на представлении о кооперативной реакции кластеров частиц, образующихся в процессе деформации вблизи поверхностей скольжения. Представим кластеры в виде клиньев скольжения, обращенных ребром вниз, с гранями – поверхностями скольжения, наклоненными к оси пробы под углом 45° .

Пусть клинья скольжения образуют слой под штампом прибора толщиной $M_{4s} / \sqrt{2}$. При скольжении клина под действием внешнего давления на его основание на гранях действует предельное касательное напряжение трения τ_{lim} . Суммарную реакцию первого слоя приравняем приращению внешней силы, выраженному через приращение давления Δp_r :

$$\Delta p_r = \frac{\tau_{lim}}{\sqrt{2}} \left(1 + \frac{L_{s4}}{2M_{s4}} \right), \quad (15)$$

откуда вычисляется напряжение трения τ_{lim} .

Вычисленные по данным компрессионного сжатия характеристики модели деформации песка (таблица 3) позволяют оценить влияние на них состояния песка. Например, значения напряжения трения для сухого и водонасыщенного песка одинакового состава практически одинаковы.

Напряжение трения в песке с глинопорошком существенно меньше, чем без глинопорошка.

Еще в большей степени происходит уменьшение модуля деформации мелкозема, в той же последовательности сравнения. Обозначим левую часть уравнения (13) буквами $\Delta \varepsilon_e$:

$$\Delta \varepsilon_e = \frac{2(\Delta s_e + \Delta s'_e)}{H_s}. \quad (16)$$

Модуль деформации мелкозема характеризует сопротивление сжатию мелкой фракции песка на нисходящей ветви цикла деформации и рассчитывается по формуле

$$E_e = \frac{\Delta p_e}{\Delta \varepsilon_e}. \quad (17)$$

Наибольшие значения E_e получены для сухого песка. Для водонасыщенного песка они меньше, для песка с глинопорошком – меньше в разы (таблица 3). Это понятно, если принять во внимание уменьшение контактного трения между частицами песка, вызванное водой и частицами глинистых минералов. Во всех вариантах испытанных грунтов значения E_e меньше, чем соответствующие значения компрессионного модуля общей деформации E_o , рассчитанного традиционным способом для пробы в целом (таблица 4).

ТАБЛИЦА 4 – СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ ПЕСКА

| φ | E_o | E_e | τ_{lim} |
|-----------------------------|-------|-------|--------------|
| grad | МПа | МПа | кПа |
| Сухой песок | | | |
| 45,2 | 8,0 | 7,1 | 3,3 |
| Водонасыщенный песок | | | |
| 44,5 | 4,5 | 3,7 | 3,1 |
| Сухой песок с глинопорошком | | | |
| 37,2 | 1,3 | 1,0 | 1,1 |

Уравнение, связывающее отношение приращений механической работы на восходящей и нисходящей частях цикла деформации с характеристиками микроструктуры:

$$\frac{p \Delta s_e}{H_s (p + \Delta p_r) \Delta p_e} = \frac{L_{3s} m_e \sqrt{2}}{M_{4s} \tau_{lim}} \quad (18)$$

Угол внутреннего трения песка свяжем с морфологической моделью микроструктуры соотношением (рисунок 5):

$$\varphi = 2\delta, \quad (19)$$

где δ – угол отклонения поверхности скольжения ω от поверхности максимальных касательных напряжений Ω .

$$\delta = \arctg \frac{L_{s4}}{2M_{s4}}, \quad (20)$$

Угол внутреннего трения для водонасыщенного песка меньше, чем для сухого, а песка с глинопорошком значительно меньше, чем водонасыщенного (таблица 4).

3 ОПИСАНИЕ УПЛОТНЕНИЯ ПЕСКА

ПО МИКРОСТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ДЕФОРМАЦИИ

Компрессионное сжатие представляет собой удобный вид испытания песка, пригодный для определения его микроструктурных характеристик. Проба песка нагружается двумя сближающимися жесткими поверхностями штампов одометра, что позволяет представить первичные кластеры песка в виде клиньев (гиперкластеров), идущих от штампов навстречу друг другу. На этапе их образования, в начальном интервале $\sigma_o < \sigma \leq \sigma_{s,s}$, «скорость» осадки велика, и ее среднее значение практически постоянно, что указывает на одинаковый механизм уплотнения для циклов этого интервала: образование первичных гиперкластеров, происходящее от штампов вглубь пробы последовательно, слоями, реакция которых изменяется циклически.

Штампы задают форму клиньев. Клинья не могут иметь осесимметричную форму, повторяющую форму пробы, в силу того, что неизбежный поворот хотя бы одного штампа вокруг горизонтальной оси инициирует образование гиперкластеров, вытянутых вдоль этой оси. Поэтому уплотнение пробы происходит не только анизотропно, но с формированием микроструктуры, состоящей на начальном интервале давления из слоев гиперкластеров, вытянутых в одном направлении.

Такая модель деформации дает возможность определения значений микроструктурных характеристик.

После встречи клиньев в средней части пробы при $\sigma = \sigma_{s.s}$ деформация определяется уже образованием вторичных кластеров внутри первичных. Можно предположить, что этот процесс также начинается вблизи жестких штампов (одновременно с образованием первичных кластеров) и также идет слоями, что и он порождает цикличность «скорости» осадки, которая возможна при кооперативной реакции микроструктуры. Штампы и здесь играют роль «организаторов» кооперативного отклика пробы на внешнее воздействие.

Очевидно, что образование вторичных кластеров происходит на более мелких порах и требует большего напряжения. Действительно, приращения давления в цикле деформации на интервале $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$ имеют большее значение, чем на начальном интервале (таблицы 1 и 2).

Дробление кластеров на вторичные происходит в описанных опытах в интервале $\sigma_{s.s} < \sigma \leq \sigma_{fin}$ и теоретически может продолжаться до значения внешнего давления $\sigma = p_u$, когда выполнится условие (6), т. е. когда «скорость» поверхностями скольжения сравнивается со «скоростью» уплотнения мелкозема. Это будет означать, что в пробе в целом не осталось крупных пор, больших по размерам, чем поры в мелкоземе. При этом проба превращается в один большой кластер.

ВЫВОДЫ

Эффект скачкообразного изменения осадки и, соответственно, циклического изменения «скорости» осадки песчаной пробы в компрессионном приборе возникает в результате образования кластеров и гиперкластеров в песчаном теле при всестороннем сжатии. Сначала формируются первичные гиперкластеры, пока они не займут основной объем пробы, а затем процесс уплотнения определяется вторичными кластерами, развитие которых приводит пробу в более однородное состояние большого кластера.

Для описания этого процесса построена двухпорядковая модель микроструктуры, включающая средние размеры наиболее крупных пор (НКП) и наиболее крупных зерен (НКЗ), погруженных в среду мелкозема, размеры гиперкластеров и их слоев в пробе. Гиперкластеры формируют несимметричную микроструктуру песка, следовательно, реакция пробы на ее границах также несимметрична, и уплотнение пробы, в целом, происходит неоднородно и анизотропно.

Характеристики модели деформации определяются по данным опыта с компрессионным сжатием пробы песка постоянно возрастающей нагрузкой при непрерывном измерении деформации пробы. Установлены аналитические связи характеристик модели с феноменологическими характеристиками песка: напряжением внутреннего трения, углом внутреннего трения, модулем деформации мелкозема и модулем деформации пробы песка. Сравнение результатов, полученных для сухого и водонасыщенного песка, а также для сухого песка с глинопорошком подтверждают адекватность модели деформации объекту исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн М. С. Иммерман А. Г. О статических свойствах сыпучего тела в предельном равновесии // Массивные и стержневые конструкции. М.: Госстройиздат, 1952. С. 183–223.

2. Болдырев Г. Г., Никитин Е. В. Деформация песка в основании полосового штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. № 1, 1987. С.
3. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Новые результаты компрессионных испытаний грунтов // Проект, № 4, 1995. С. 26–28.
4. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. О сжимаемости грунтов при компрессионных испытаниях методом постоянно возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 12. С. 108–120.
5. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Об экспериментальных компрессионных приборах для исследования сжимаемости грунтов постоянно возрастающей нагрузкой // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 9. С. 363–384.
6. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Ускоренное определение сжимаемости грунтов методом ПВН // Проектирование и инженерные изыскания. 1994. № 1. С. 7–9.
7. Денисов Н. Я. Природа прочности и деформаций грунтов. М. : Стройиздат, 1972. 279 с.
8. Дидух Б. И. Упругопластическое деформирование грунтов. М. : Изд-во УДН, 1987. 166 с.
9. Дрешер А., Ж. де Йоселен де Йонг, Проверка механической модели течения гранулированного материала методами фотоупругости // Новое в зарубежной науке: Механика. М. : Мир, 1975. С. 144–165.
10. Ляшенко П. А. Модель деформации микроструктуры грунта // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс].-Краснодар: КубГАУ, 2005.-№ 11(03).-<http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.
11. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. Краснодар : КубГАУ, 2009. № 45(1).
<http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.
12. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта / Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс], 2012, № (04)78. – С. 278-305.
13. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Совершенствование компрессионных испытаний грунтов на основе цикличности сжимаемости. Деп. во ВНИИТПИ, № 11335, 1993.
14. Ляшенко П. А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. Краснодар : Изд. КубГАУ, 2014. 161 с.
15. Рыжов А. М., Вихарев В. П. Случай разжижения песка в пойменной насыпи // Вопросы геотехники. Сб. 3. Под ред. проф. М. Н. Гольдштейна. Днепропетровск : Днепропетровское книжное изд-во, 1959. С. 243–260.
16. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс). М. : Высш. школа, 1983. 288 с.

REFERENCES

1. Bernshtejn M. S. Immerman A. G. O staticheskikh svojstvah sypuchego tela v predel'nom ravnovesii // Massivnye i sterzhnevye konstrukcii. M.: Gosstrojizdat, 1952. S. 183–223.
2. Boldyrev G. G., Nikitin E. V. Deformacija peska v osnovanii polosovogo shtampa // Osnovaniya, fundamenti i mehanika gruntov. № 1, 1987. S.

3. Denisenko V.V., Ljashenko P.A. Novye rezul'taty kompressionnyh ispytaniy gruntov // Proekt, № 4, 1995. S. 26–28.
4. Denisenko V.V., Ljashenko P.A. O szhimaemosti gruntov pri kompressionnyh ispytaniyah metodom postojanno vozrastajushhej nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. 2015. № 12. S. 108–120.
5. Denisenko V.V., Ljashenko P.A. Ob jeksperimental'nyh kompressionnyh priborah dlja issledovaniya szhimaemosti gruntov postojanno vozrastajushhej nagruzkoj // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. 2015. № 9. S. 363–384.
6. Denisenko V.V., Ljashenko P.A. Uskorennoe opredelenie szhimaemosti gruntov metodom PVN // Proektirovanie i inzhenernye izyskanija. 1994. № 1. S. 7–9.
7. Denisov N. Ja. Priroda prochnosti i deformatsij gruntov. M. : Strojizdat, 1972. 279 s.
8. Diduh B. I. Uprugoplasticheskoe deformirovanie gruntov. M. : Izd-vo UDN, 1987. 166 s.
9. Dresher A., Zh. de Joselen de Jong, Proverka mehanicheskoj modeli techenija granulirovannogo materiala metodami fotouprugosti // Novoe v zarubezhnoj nauke: Mehani-ka. M. : Mir, 1975. S. 144–165.
10. Ljashenko P. A. Model' deformacii mikrostruktury grunta // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs].-Krasnodar: KubGAU, 2005.-№ 11(03).- <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.
11. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Vychislenie harakteristik mikrostruktury grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obrazca // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. Krasnodar : KubGAU, 2009. № 45(1). <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.
12. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Kontaktnoe vzaimodejstvie jelementov mikrostruktury glinistogo grunta / Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs], 2012, № (04)78. – S. 278-305.
13. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Sovershenstvovanie kompressionnyh ispytaniy gruntov na osnove ciklichnosti szhimaemosti. Dep. vo VNIINTPI, № 11335, 1993.
14. Ljashenko P. A. Soprotivlenie i deformatsii glinistogo grunta. Krasnodar : Izd. KubGAU, 2014. 161 s.
15. Ryzhov A. M., Viharev V. P. Sluchaj razzhizhenija peska v pojmennoj nasypi // Voprosy geotehniki. Sb. 3. Pod red. prof. M. N. Gol'dshtejna. Dnepropetrovsk : Dnepropetrovskoe knizhnoe izd-vo, 1959. S. 243–260.
16. Cytovich N. A. Mehanika gruntov (kratkij kurs). M. : Vyssh. shkola, 1983. 288 s.