

УДК 624.131.4

UDC 624.131.4

05.00.00 Технические науки

Engineering sciences

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПРЕССИОННОГО СЖАТИЯ ПЕСКА**PHYSICAL MODELING OF ODOMETRIC COMPRESSION OF SAND**

Ляшенко Павел Алексеевич

к. т. н., доцент

SPIN-код 5503-9110

Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Lyashenko Pavel Alekseevich

Cand. Tech. Sci., associate Professor

RSCI SPIN-code 5503-9110

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

E-mail: lyseich1@yandex.ru

Денисенко Виктор Викторович

к. т. н., доцент

SPIN-код 8558-4247

*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*E-mail: denvivi@kubstu.ru

Denisenko Viktor Viktorovich

Cand. Tech. Sci., associate Professor

RSCI SPIN-code 8558-4247

*Kuban State Technologic University, Krasnodar, Russia*E-mail: denvivi@kubstu.ru

Компрессионное сжатие песка с постоянно возрастающей нагрузкой (ПВН) или постоянной скоростью деформации (ПВД) и непрерывной регистрацией соответствующей реакции позволяет выявить эффект ступенчатого изменения деформации (при ПВН) и силовой реакции (при ПВД). Этот эффект можно объяснить на основе модели деформации, созданной авторами ранее. Физическое моделирование компрессионного сжатия на песчаной модели показало, что главные предпосылки, положенные в основу модели деформации, верны. Физическая модель была выполнена из мелкого песка с марками, имитирующими крупные включения. Сжатие грунта с ПВД происходило неравномерно, ступенчато, причем скорость деформации верхней границы песчаной модели, по отношению к давлению на ней, изменялась циклически. Максимальные значения амплитуд циклов проходили через максимум, как это наблюдалось ранее при компрессионных испытаниях песка с ПВН в одометре компрессионного прибора. Внутри песчаной модели испытательном стенде неравномерность деформаций выразилась во взаимных смещениях смежных частей, находящихся на одной глубине от верхней подвижной границы песчаной модели. По мере роста внешнего воздействия, марки показывали увеличение или уменьшение перемещений и даже перемещения, противоположные направлению движения (осадке) верхней границы модели – «всплытие» марок. Марки, находящиеся на разных глубинах, получали одновременно разные перемещения, в том числе, взаимно противоположные. При достаточно большом внешнем воздействии произошло резкое увеличение осадок всех марок, уменьшающееся с глубиной от верхней границы песчаной модели. Эти приращения осадок сохранилось до окончания нагружения. Они явились подтверждением гипотезы о тотальном разрушении образца грунта при давлении «структурной

The odometric compression of sand with constant rate of loading (CRL) or constant rate of deformation (CRD) and continuous registration of the corresponding reaction allows to identify the effect of stepwise changes of deformation (at the CRL) and the power reaction (at the CRD). Physical modeling of compression on the sandy model showed the same effect. The physical model was made of fine sand with marks, mimicking large inclusions. Compression of the soil at the CRD was uneven, stepwise, and the strain rate of the upper boundary of the sandy model changed cyclically. Maximum amplitudes of cycles passed through a maximum. Inside of the sand model, the uneven strain resulted in the mutual displacement of the adjacent parts located at the same depth. The growth of external pressure, the marks showed an increase or decrease in displacement and even move opposite to the direction of movement (settlement) the upper boundary of the model – "floating" of marks. Marks, at different depths, got at the same time different movements, including mutually contradictory. The mark settlements sudden growth when the sufficiently large pressure. These increments in settlements remained until the end of loading decreasing with depth. They were a confirmation of the hypothesis about the total destruction of the soil sample at a pressure of "structural strength". The hypothesis of the "floating" reason based on the obvious assumption that the marks are moved together with the surrounding sand. The explanation of the effect of "floating" is supported by the fact that the value of "floating" the more, the greater the depth

прочности». Приводится гипотеза о причине «всплытия», основанная на очевидном допущении, что марки перемещаются совместно с окружающим их песком. Предложенное объяснение эффекта «всплытия» подтверждается тем фактом, что значение «всплытия» тем больше, чем больше глубина положения марок

Ключевые слова: ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ, ОСАДКА, ВСПЛЫТИЕ, ПЛОЩАДКА СКОЛЬЖЕНИЯ, ПОВЕРХНОСТЬ СКОЛЬЖЕНИЯ, СТРУКТУРНАЯ ПРОЧНОСТЬ

Keywords: PHYSICAL MODEL, DEFORMATION MODEL, ODOMETRIC COMPRESSION, SETTLEMENT, RATE OF SETTLEMENT, FLOATING, FLAT AREA, SLIDE SURFACE, STRUCTURAL STRENGTH

Doi: 10.21515/1990-4665-122-047

ВВЕДЕНИЕ

Компрессионное испытание является удобным инструментом моделирования поведения грунтов под нагрузкой. Оно часто используется в инженерно-геологических изысканиях для определения сжимаемости грунта и реакции его на разные виды физических и химических воздействий. Цилиндрический образец грунта подвергается осевому сжатию без возможности бокового расширения. Задается сжимающая сила или граничная деформация сжатия и измеряется, соответственно, деформация или силовая реакция образца.

При интерпретации результатов традиционно исходят из предположения о однородном изотропном сжатии грунта, которое иллюстрируется гладкой диаграммой зависимости деформации сжатия от давления на торце образца.

Испытания в компрессионном приборе с постоянно возрастающей нагрузкой (ПВН) и непрерывной регистрацией деформации показали, что эта зависимость не является гладкой: деформация увеличивается ступенчато, а ее скорость изменяется циклически при постоянной скорости увеличения давления [1-7]. Этот эффект проявляется и при постоянной скорости деформации (ПСД) и непрерывной регистрации реактивной силы: реакция изменяется ступенчато.

В обеих схемах испытаний эффект указывает на сложный характер деформации грунта, состоящей в перестройке его микроструктуры. Нами создана модель деформации микроструктуры, которая не только объясняет эффект ступенчатости, но и позволяет оценить численно ее параметры на основе данных компрессионных испытаний с ПВН [1-15].

Аналізу подверглись, в основном, глинистые грунты. Однако подобный эффект присутствует и в песках. Как и в глинистых грунтах, деформация образца песка происходит ступенчато при ПВН. Так же выделяется значение давления, после которого деформация резко увеличивается, – «структурная прочность» [2, 3, 5, 12].

Для того, чтобы разобраться в эффекте ступенчатости подробнее, мы рассмотрели поведение песка при компрессионном сжатии с ПСД на плоской модели. Известно, что деформация осесимметричного тела может быть описана с помощью решений для плоской деформации его сечения. Это верно для упругой стадии статической работы тела. Поэтому результаты исследования, в котором песок использован в качестве модельного материала, ограничены его свойствами сыпучего тела.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОГО ГРУНТА

Одной из предпосылок, принятой для построения модели деформации, является неоднородность грунта, являющаяся его неотъемлемым свойством и определяющая его деформируемость и прочность. Принятая нами физическая модель состояла из мелкого сухого песка и крупных включений, расставленных по регулярной сетке.

Песчаная модель была помещена в лоток с размерами 265 x 60 мм в плане и глубиной 52 мм. Песок укладывался в модель с уплотнением путем равномерного статического прессования. Плотность уложенного песка 1,13 г/см³.

Лоток имел три жесткие неподвижные стенки и одну жесткую подвижную, которая играла роль штампа для перемещения границы модели.

Значения перемещений границы измерялись двумя датчиками часового типа ИЧ-10. Силовая реакция модели измерялась динамометром сжатия ДОСМЗ-02 (рисунок 1).

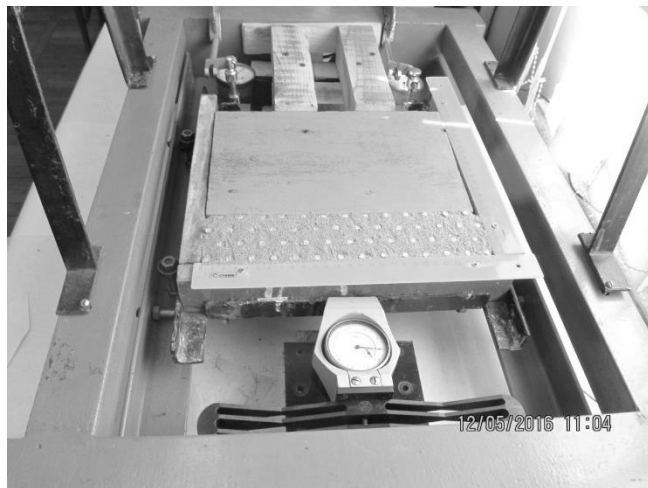


Рисунок 1 – Вид испытательного стенда и модели песчаного образца с марками для наблюдения перемещений. В передней части снимка виден динамометр сжатия, в задней – датчики перемещений лотка с моделью

В песок были вставлены на всю глубину лотка стальные цилиндры диаметром 6 мм, имитирующие жесткие включения в квазиоднородной песчаной матрице и занимающие в ней 10% объема. Торцы цилиндров, обращенные к наблюдателю, были снабжены этикетками с номерами и перекрестиями для визуальной фиксации их положения в лотке и играли роль марок перемещений. Положение марок регистрировалось фотоаппаратом.

Марки перемещений были расположены четырьмя рядами в шахматном порядке (рисунок 2). Для калибровки данных фотофиксации на лотке были укреплены линейки с метрическими шкалами. Нагрузка на модель прикладывалась через штамп к верхней грани модели (дальней грани на рисунке 1). Штамп соприкасался со всей поверхностью верхней грани. Конструкция лотка предусматривает поступательное движение штампа. Кроме того, глубина лотка близка к высоте модели. Эти факторы обеспечивали равномерную деформацию модели по глубине и отсутствие поворотов цилиндрических марок в вертикальной плоскости при деформации модели.

Лоток приводился в движение электромеханическим устройством, обеспечивающим постоянную скорость перемещения штампа относительно лотка, т. е. постоянную скорость деформации верхней границы модели.

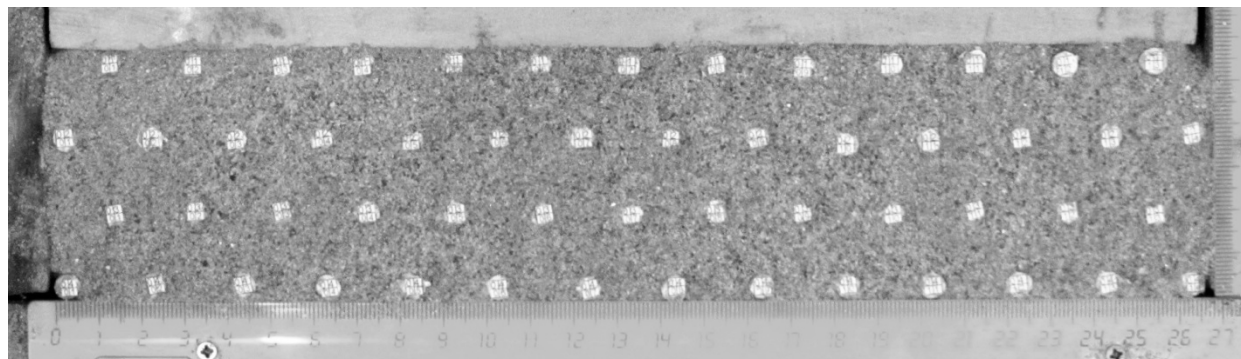


Рисунок 2 – Вид песчаной модели с марками и линейками.
К верхней границе модели приложен штамп

Эта скорость вычислена по осадки штампа как среднему значению показаний датчиков перемещений лотка и по среднему значению реактивного давления штампа. Давление увеличивается неравномерно с увеличением осадки. Однако удобнее принять обратную зависимость осадки от давления (рисунок 3).



Рисунок 3 – График осадки верхней границы модели

Характерный для компрессионных испытаний изгиб графика указывает на преодоление структурной прочности грунта модели

при 2,1 кПа. Значение структурной прочности наиболее четко определяется по графику скорости осадки границы модели [2, 3, 5, 8, 12] (рисунок 4).

График скорости осадки имеет циклический характер, как и в случае испытаний песка в одомере компрессионного прибора [8]. Наличие эффекта циклического изменения скорости осадки дает основание утверждать, что модель в лотке и образец в одомере деформируются по одним законам.



Рисунок 4 – График скорости осадки верхней границы модели

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ МАРОК

Перемещения марок регистрировались методом фотофиксации, фотоснимки импортировались в файл программы AutoCAD, затем измерялись координаты каждой марки последовательно для каждого фотоснимка. Нумерация рядов марок была принята сверху вниз, марок к ряду – слева направо (рисунки 2 и 5). За начало координат для всех фотоснимков принимался нуль на нижней линейке, закрепленной на модели (рисунок 2). По координатам вычислены перемещения марок в каждый момент фотофиксации (их было 15) и построены траектории перемещений.

Общая картина перемещений всех марок приведена на рисунке 5. Она, в целом, несимметрична, а именно, значения перемещений увеличиваются слева направо. Это вызвано естественной асимметрией деформации модели. Горизонтальные линии проведены через центры марок для обеспечения наглядности. Таких линий четыре, их номера обозначены в числи-

теле номера каждой марки. Увеличение перемещений слева направо при-
суще всем четырем линиям. Пунктирными линиями обозначены предпола-
гаемые поверхности скольжения, а точками – «всплывающие» марки, ко-
торые будут обсуждаться ниже. Здесь же показан общий план перемеще-
ний марок. Часть их показана в более крупном масштабе на рисунке 6.

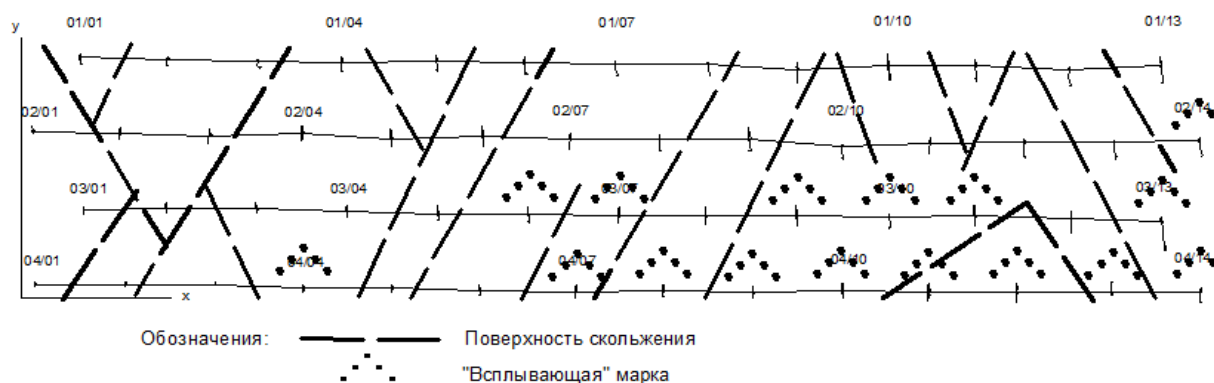


Рисунок 5 – Схема модели с траекториями перемещений марок

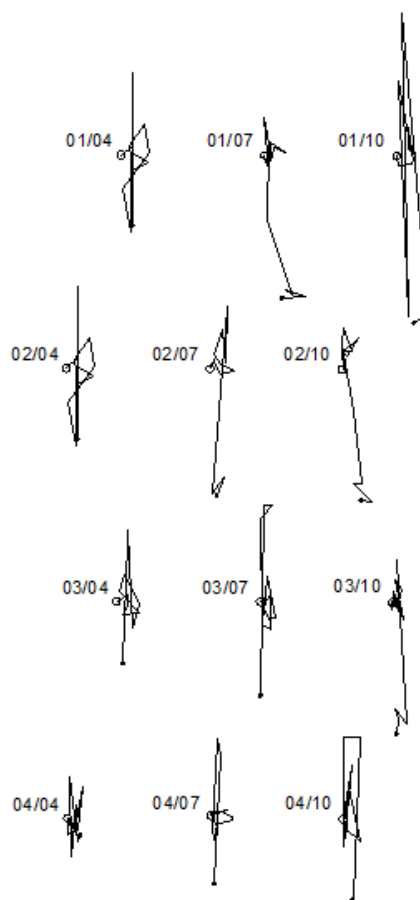


Рисунок 6 – Траектории перемещений 12-ти марок (кружком обозначено исходное положение марки, сплошной точкой – ее последнее положение)

Все перемещения характеризуются сле-
дующими общими чертами:

- а) вначале перемещения малы, часто ме-
няют ориентацию, позиции марок располага-
ются справа от исходного положения марки. Очевидно, что первое является следствием вы-
борки люфтов экспериментальной установки, второе – ее естественной асимметрии;
- б) затем некоторые марки устремляются
вверх от исходного положения, «всплывают»,
после чего возвращаются близко к исходной

точке и погружаются, тем больше, чем правее расположена марка от исходной точки;

в) все марки заканчивают путь в погруженном, относительно исходной точки, состоянии, их траектории вытянуты вдоль вертикальной оси Оу, т. е. направления перемещения границы модели (рисунки 5 и 6).

На рисунке 6 видно, что: 1) все точки траекторий расположены справа от начальной точки. Это следствие естественной асимметрии модели; 2) перемещения марок ориентированы, в основном, вдоль оси заданных перемещений границы. Только первые движения имеют заметную поперечную составляющую, но они имеют относительно малые значения; 3) перемещения всех марок колеблются вдоль сжимающей силы, причем смена их направления (погружение-«всплытие») происходит резко – на смежных или близких шагах нагружения.

Вертикальные перемещения всех марок приведены на рисунках 7–10. При обсуждении будем привязывать их не только к граничным перемещениям, заданным в опыте, но и к давлению, которое граничные перемещения вызвали. Согласно введенной системе координат (рисунок 5), перемещение вверх («всплытие») имеет положительное значение, вниз (осадка) – отрицательное.

Таблица обозначений точек на рисунках 7 – 10

Давление, кПа	Номер точки наблюдения	Обозначение
1,61	1	◆
1,79	2	■
2,14	3	△
2,23	4	▲
2,32	5	×
3,03	6	+
3,57	7	✱
4,28	8	●
5,36	9	□
7,31	10	•
9,28	11	—
10,71	12	◇
11,60	13	○

На эпюрах перемещений видно, что движения смежных точек одной линии заметно отличаются одно от другого. Например, на линии 01 в точке 01 марка 01/01 на протяжении длительного времени движется вниз, а в точке 03 (01/03) – остается на месте или перемещается вниз, но меньше, чем

марка 01/01 (рисунок 7). Марка 01/06 перемещается вниз, 01/07 – стоит на месте, 01/08 – перемещается вверх. При значениях давления 3,57 – 7,31 кПа (таблица, рисунок 7) все

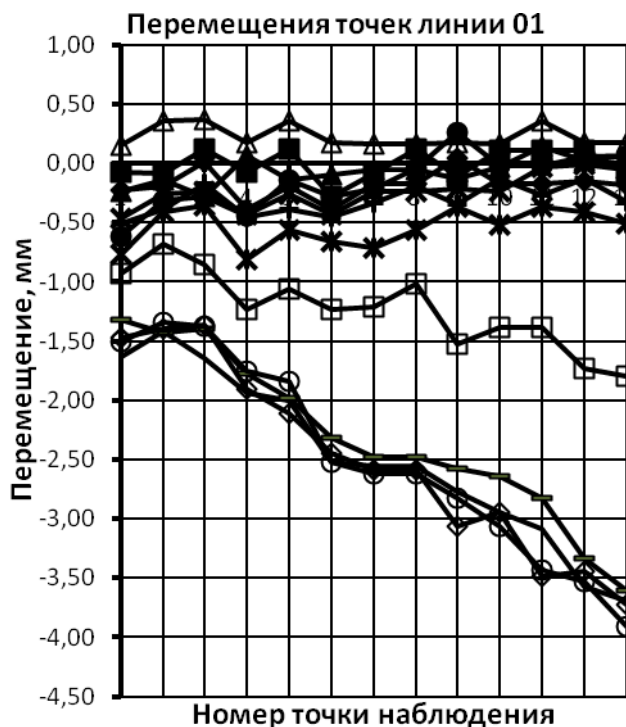


Рисунок 7 – Эпюры перемещений марок на верхней линии 01

марки получают большие перемещения, при последующих значениях давления практически не движутся.

Последнее наблюдение верно и для трех других линий марок, но перемещения в интервале давлений 3,57 – 7,31 кПа уменьшаются с увеличением глубины расположения линии

(рисунки 8–10). Всем линиям присуще неодинаковое перемещение смежных марок в один и тот же момент нагружения модели.

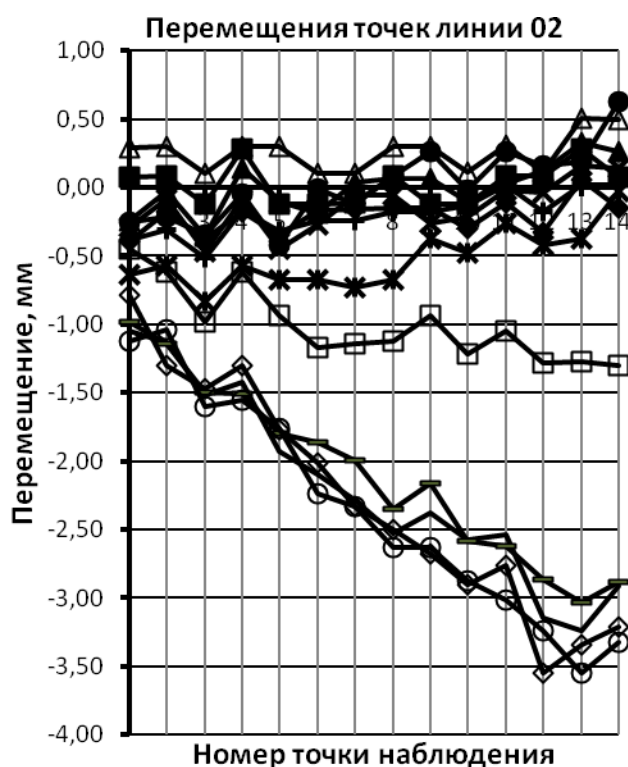


Рисунок 8 – Эпюры перемещений марок на второй сверху линии 02

На всех линиях осадки марок, в общем, увеличиваются

слева направо, что является следствием асимметрии нагружения, и уменьшаются сверху вниз. «Всплытие» марок, напротив, увеличивается сверху вниз.

Проследить кинематику марок можно по графикам на рисунках 11–14, построенных для выбранных точек из рисунка 6.

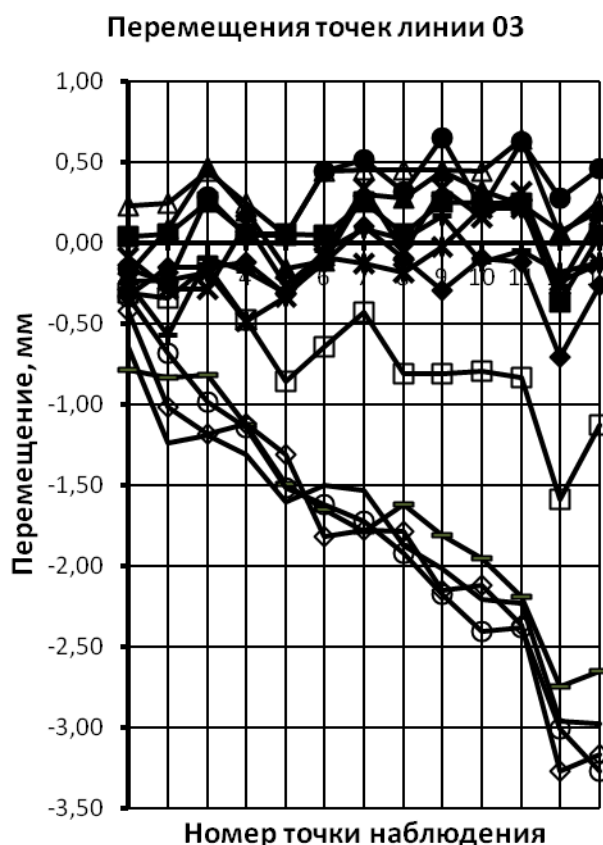


Рисунок 9 – Эпюры перемещений марок на третьей сверху линии 03

В начале испытания модели, при малых значениях давления (до 2 кПа) марки движутся вниз, получая отрицательные перемещения (осадку). Потом при давлениях в интервале 2–3 кПа на линиях 01 и 02 марки движутся вверх, а после 3 кПа – вниз. На линиях 03 и 04 движение вверх сохраняется до 5 кПа (рисунки 11–14).

В начале испытания модели, при малых значениях давления (до 2 кПа) марки движутся вниз, получая отрицательные перемещения (осадку). Потом при давлениях в интервале 2–3 кПа на линиях 01 и 02 марки движутся вверх, а после 3 кПа – вниз. На линиях 03 и 04 движение вверх сохраняется до 5 кПа (рисунки 11–14).

На всех линиях наблюдений при давлениях больше 5 кПа зарегистрирован быстрый рост осадок, т. е. отрицательных перемещений. Эти перемещения сохраняются до конца опыта при 11,6 кПа.

Таким образом, требуют объяснения несколько эффектов:

1) смежные марки, лежащие на одной линии (на одной глубине от верхней границы модели), перемещаются на разную величину при одном давлении;

2) при малых давлениях марки перемещаются вверх, в то время как верхняя граница модели перемещается вниз на заданную величину осадки;

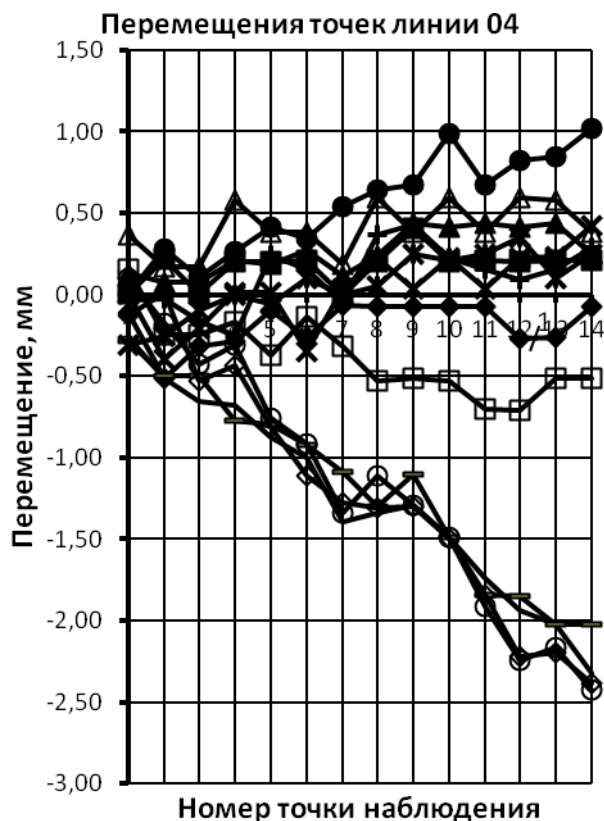


Рисунок 10 – Эпюры перемещений марок на нижней линии 04

3) все марки получают большие перемещения в узком интервале значений давления после некоторого давления на верхней границе, и эти перемещения остаются большими при дальнейшем нагружении.

Ответы на эти вопросы позволят понять, почему реакция на верхней границе модели изменяется ступенчато, будь то силовая реакция при постоянной скорости деформации или деформация при постоянно возрастающем давлении.

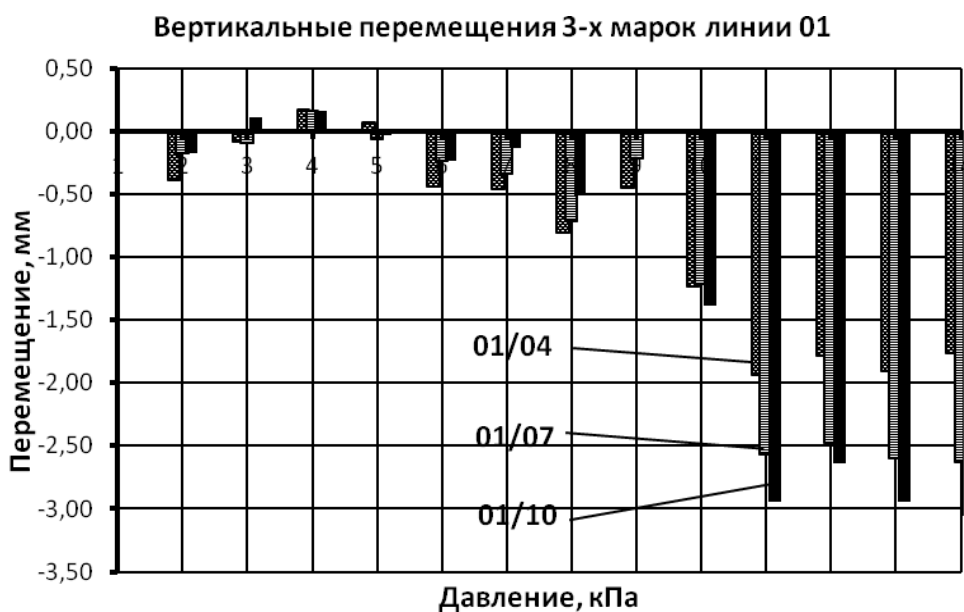


Рисунок 11 – Графики перемещений 3-х марок на верхней линии 01

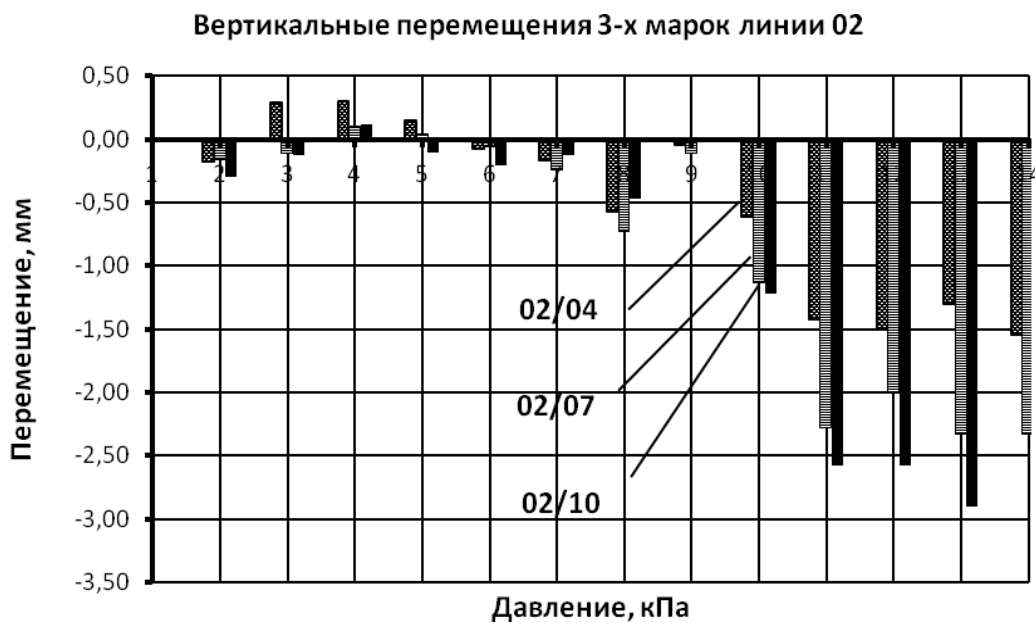


Рисунок 12 – Графики перемещений 3-х марок на второй линии 02

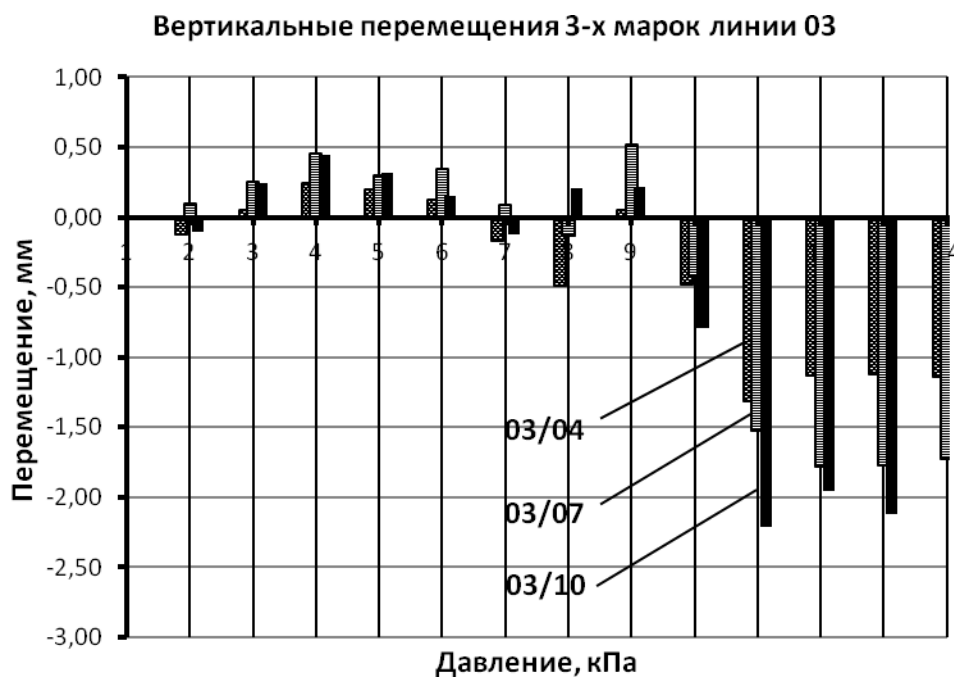


Рисунок 13 – Графики перемещений 3-х марок на третьей линии 03

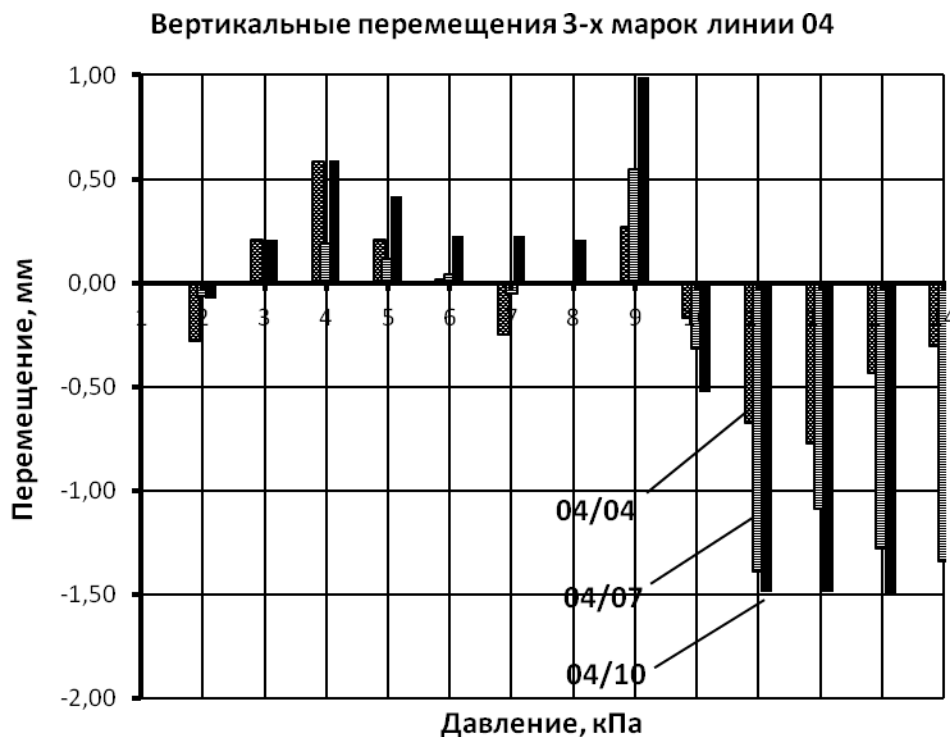


Рисунок 14 – Графики перемещений 3-х марок на нижней линии 04

ПРИЧИНЫ «ВСПЛЫТИЯ» МАРОК

Рассмотрим причины того, что марки устремляются вверх от исходного положения, «всплывают», в то время как верхняя граница модели принудительно перемещается вниз. Напомним, что физическая модель компрессионного образца состоит из мелкого однородного песка и крупных круглых жестких включений – марок.

Предположим, что при перемещении верхней границы модели скорости песчинок уменьшаются линейно с увеличением расстояния от границы. Скорость перемещения марки, увлекаемой песком, примем равной средней скорости в пределах сечения марки (рисунок 15а):

$$V_1 = (V_{m1} + V_{m2}) / 2,$$

где V_1 – скорость марки; V_{m1} и V_{m2} – скорости песка на верхней и нижней гранях марки, соответственно.

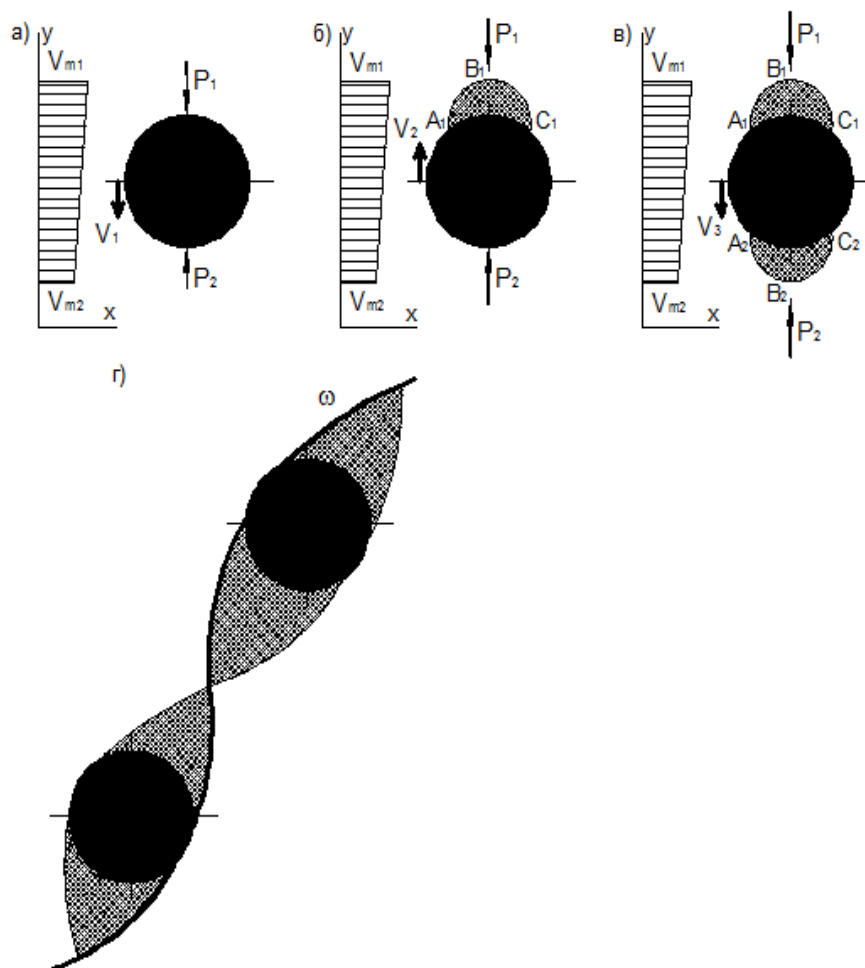


Рисунок 15 – Схема образования поверхностей скольжения между марками

Очевидно, что скорость песчинок перед верхней гранью марки больше скорости марки, поэтому они накапливаются на ее верхней грани, передавая ей количество движения и силу $P_1 > P_2$. С самого начала движения песок над верхней гранью начинает переходить в предельное по прочности состояние, уплотняется и упрочняется на площадках скольжения [8].

Область уплотнения $A_1B_1C_1A_1$ изменяет характер взаимодействия песка с маркой: на линии AC напряжения стабилизируются, и рост силы P_1 замедляется. В то же время, на нижней грани нарастает сопротивление песка P_2 , находящегося в допредельном состоянии при бóльшем среднем

напряжении, чем перед лицевой гранью. В момент, когда $P_1 < P_2$, марка начинает двигаться в обратном направлении, вверх, со скоростью V_2 (рисунок 15б) – марка «всплывает», выдавливаемая песчинками под нижней гранью. Это представление подтверждается тем, что наибольшее «всплытие» продемонстрировали марки нижней линии, для которых сила P_2 должна быть наибольшей из-за близости нижней границы модели (рисунок 5).

При дальнейшем увеличении перемещения границы модели под нижней гранью образуется область уплотнения $A_2B_2C_2A_2$, реактивные силы выравниваются: $P_1 = P_2$, а затем вновь изменяют соотношение: $P_1 > P_2$ (рисунок 15в). Этот переход происходит плавно (рисунки 11–14), так как песок вблизи марок перешел в предельное состояние постепенно, по мере перемещения границы модели.

ОБРАЗОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Области предельного состояния вблизи марок растут, причем наиболее интенсивно – между смежными марками, расположенными вдоль линии действия реактивных сил. Они состоят из площадок скольжения. С увеличением внешней нагрузки происходит увеличение площадок скольжения, а затем их слияние с образованием тотальных поверхностей скольжения ω (рисунок 15г).

Образование площадок скольжения вызывает взаимное смещение марок, всегда – подвижной, в данный момент, марки относительно неподвижной. Образование тотальных поверхностей скольжения, пересекающих всю модель, вызывает резкий рост перемещений группы смежных марок и части модели, в которой они сконцентрированы. Этот момент обнаруживается по резкому увеличению перемещения марок вдоль какой-либо линии, заметному на эпюрах (рисунки 7 –10) и графиках (рисунки 11–14).

Эта линия и является следом тотальной поверхности скольжения. Нами выявлено несколько таких линий в испытываемой модели (рисунок 5).

При испытании песка в компрессионном приборе момент образования тотальных поверхностей скольжения регистрируется как резкое увеличение осадки образца. Соответствующее давление можно рассматривать как «структурную прочность» [8]. В рассматриваемой здесь модели компрессионного сжатия песка наблюдаются все признаки «структурной прочности»: резкое увеличение осадки и скачок скорости осадки (рисунки 3 и 4).

Предлагаемая схема взаимодействия песка и марок, как матрицы мелких частиц и крупных включений объясняет отмеченные выше эффекты: «структурную прочность» и «всплытие» марок. Относительное перемещение смежных марок вызвано сдвигом во времени формирования областей уплотнения песка вокруг них и площадок скольжения между ними. Как видно на эпюрах перемещений, иногда эти процессы идут синхронно. Тогда это может быть причиной выделения кластеров, включающих несколько марок с окружающим их песком и движущихся некоторое время как жесткое тело [8].

Резкий рост осадок образца грунта объясняется в механике грунтов как преодоление «структурной прочности» глинистых грунтов ненарушенной структуры [2, 3, 5, 12]. Этот эффект связывают с разрушением цементационных связей. Однако он присущ и уплотненным пескам. Объяснить его можно на основе рассмотрения деформации грунта как процесса множественных локальных разрушений площадками скольжения вблизи крупных включений. Тогда и цикличность скорости деформации является органичным проявлением кооперативной реакции этих разрушений на внешнюю нагрузку. «Структурная прочность» является рубежным элементом этого процесса, указывающим на момент его максимальной интенсивно-

сти, когда происходит разрушение образца тотальными поверхностями скольжения.

Причиной встречного, направленного против перемещения границы модели, движения марок – «всплытия» – является выдавливание крупных включений частицами песка. Оно возможно при значительной разнице средних размеров частиц песка и включений.

ВЫВОДЫ

1. Испытание физической модели песка с крупными включениями при постоянной скорости деформации ее границы показало, что силовая реакция изменяется неравномерно. Анализ обратной связи между этими величинами выявил цикличность скорости деформации. Максимальные значения скорости деформации проходят через максимум, как и при испытании песка в одомере компрессионного прибора. Это подтверждает правомерность моделирования компрессионного сжатия в плоской модели.

2. Компрессионное сжатие в физической модели песка с включениями (марками) вызывает движение марок не только по направлению сжатия (осадку), но и в противоположном направлении («всплытие») в результате выдавливания их вверх песчаными частицами.

3. При деформации сжатия песка наблюдаются сильно отличающиеся одно от другого по величине и по знаку перемещения марок, смежных между собой, как по направлению осевой сжимающей силы, так и в поперечном направлении. Такие различия можно объяснить только тем, что марки разделены площадками скольжения, возникающими между ними и создающими разность их перемещений.

4. При увеличении деформации сжатия перемещения марок все более следуют направлению осевой сжимающей силы. При определенном давлении значения перемещений резко возрастают на всех глубинах модели в точках, которые можно объединить одной линией. Это свидетель-

ствуется о радикальном разрушении песчаной модели тотальной поверхностью скольжения, объединяющей площадки скольжения и проходящей через всю модель, от верхней границы до нижней.

5. Представление о сжатии грунта как о последовательности актов разрушения площадками скольжения позволяет объяснить ступенчатый характер реакции на верхней границе модели. «Структурная прочность» объясняется моментом наибольшей интенсивности разрушения тотальной поверхностью скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Одометрическое исследование глинистого грунта В сборнике: Инженерная геология Северо-западного Кавказа и предкавказья: Современное состояние и основные задачи. Материалы Второй региональной научно-практической конференции. 2015. С. 138-141.

2. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Анализ методов компрессионных испытаний грунтов // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 2. С. 104-125.

3. 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.

4. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Экспериментальное обоснование правомерности сравнения компрессионных испытаний грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки и методом ступенчато возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 11. С. 416-429.

5. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Повышение точности определения структурной прочности грунтов методом постоянно возрастающей нагрузки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2015. № 3. С. 83-96.

6. Ляшенко П. А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. Краснодар, 2014. –161 с.

7. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Испытание грунта методом постоянно возрастающей нагрузки // В сборнике: Инженерная геология Северо-Западного Кавказа и предкавказья; современное состояние и основные задачи. Первая Региональная научно-практическая конференция. 2014. С. 273-276

8. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Модель деформации микроструктуры песчаного грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №04(118). С. 853-877. URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/51.pdf>.

9. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Об оценке случайной погрешности определения показателей сжимаемости грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2014. № 4. С. 52-59.

10. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Сопротивление микроструктуры глинистого грунта внешней нагрузке // В сборнике: Инженерные подходы к решению геотехниче-

ских задач. Сборник научных трудов, посвященный 80-летию Константина Шагеновича Шадунца. Краснодар, 2013. С. 48-53.

11. Денисенко В. В., Ляшенко П. А. Исследование природы сжимаемости глинистых грунтов // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2013. № 3. С. 65-68.

12. Ляшенко П. А., Денисенко В. В., Беляева Ю. А. Изучение структурной прочности глинистого грунта при постоянно возрастающей нагрузке // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2012. № 84. С. 207-221. <http://ej.ku-bagro.ru/2012/10/pdf/47.pdf>.

13. Ляшенко П. А., Денисенко В. В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2009. № 45. С. 66-82. <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

14. Ляшенко П. А. Модель деформации микроструктуры грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2005. № 11. С. 34-52. <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.

15. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012, № 78 (04). – С. 291-318. <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

REFERENCES

1. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Odometricheskoe issledovanie glinistogo grunta // V sbornike: Inzhenernaja geologija Severo-zapadnogo Kavkaza i predkavkaz'ja: Sovremennoe sostojanie i osnovnye zadachi. Materialy Vtoroj regional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii. 2015. S. 138-141.

2. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Analiz metodov kompressionnyh ispytanij gruntov // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. 2015. № 2. S. 104-125.

3. 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.

4. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Jeksperimental'noe obosnovanie pravomernosti sravnenija kompressionnyh ispytanij gruntov metodom postojanno vozrastajushhej nagruzki i metodom stupenchato vozrastajushhej nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. 2015. № 11. S. 416-429.

5. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Povyshenie tochnosti opredelenija strukturnoj prochnosti gruntov metodom postojanno vozrastajushhej nagruzki // Nauchnye trudy Kubanskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. 2015. № 3. S. 83-96.

6. Ljashenko P. A. Soprotivlenie i deformacii glinistogo grunta. Краснодар, 2014.

7. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Ispytanie grunta metodom postojanno vozrastajushhej nagruzki // V sbornike: Inzhenernaja geologija Severo-Zapadnogo Kavkaza i predkavkaz'ja; sovremennoe sostojanie i osnovnye zadachi. Pervaja Regional'naja nauchno-prakticheskaja konferencija. 2014. S. 273-276

8. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Model' deformacii mikrostruktury peschanogo grunta // Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektron-nyj resurs]. – Краснодар: KubGAU, 2016. – №04(118). URL: <http://ej.kubagro.ru/2016/04/pdf/51.pdf>.

9. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Ob ocenke sluchajnoj pogreshnosti opredelenija pokazatelej szhimaemosti gruntov // Nauka. Tehnika. Tehnologii (politehniche-skiy vestnik). 2014. № 4. S. 52-59.
10. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Soprotivlenie mikrostruktury glinistogo grunta vneshnej nagruzke // V sbornike: Inzhenernye podhody k resheniju geotekhnicheskikh zadach. Sbornik nauchnykh trudov, posvjashchennyj 80-letiju Konstantina Shagenovicha Shadunca. Krasnodar, 2013. S. 48-53.
11. Denisenko V. V., Ljashenko P. A. Issledovanie prirody szhimaemosti glinistykh gruntov // Nauka. Tehnika. Tehnologii (politehniche-skiy vestnik). 2013. № 3. S. 65-68.
12. Ljashenko P. A., Denisenko V. V., Beljaeva Ju. A. Izuchenie strukturnoj prochnosti glinistogo grunta pri postojanno vozrastajushhej nagruzke // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. № 84. S. 207-221. <http://ej.ku-bagro.ru/2012/10/pdf/47.pdf>.
13. Ljashenko P. A., Denisenko V. V. Vychislenie harakteristik mikrostruktury grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obrazca // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2009. № 45. S. 66-82. <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.
14. Ljashenko P. A. Model' deformacii mikrostruktury grunta // Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2005. № 11. S. 34-52. <http://ej.kubagro.ru/2005/03/02/p02.asp>.
15. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostrukturyi glinistogo grunta // Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). – С. 291-318. <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.