

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛИ МАССИВА ПЕСКА В ПРОЦЕССЕ ПОГРУЖЕНИЯ В НЕГО ЖЕСТКОГО ПЛОСКОГО ЗОНДА

## STUDY OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A SAND BODY MODEL AT PENETRATION OF A FLAT RIGID PROBE

СКОПИНЦЕВ Д.Г.

Инженер-исследователь ООО «НПП «Геотек»», г. Пенза,  
dmitriy.geotechnic@mail.ru

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, директор по научной работе и инновациям ООО «НПП «Геотек»», д. т. н., г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

SKOPINTSEV D.G.

Research engineer of the «NPP «Geotek»» LLC, Penza,  
dmitriy.geotechnic@mail.ru

BOLDYREV G.G.

Professor of the Penza State University of Architecture and Construction, director for research and innovation of the «NPP «Geotek»» LLC, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Условия плоской деформации; плоский жесткий зонд; массив песчаного грунта; измерение напряжений; мессдоза; цифровая обработка образов; поля деформаций.

### АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния массива песчаного грунта при погружении в него плоского жесткого зонда. Опыты выполнялись в условиях плоской деформации в лотке с прозрачными стенками. Моделировались напряжения от собственного веса грунта путем создания пригруза на поверхности песка. Измерение напряжений в массиве грунта выполнялось жесткими датчиками давления. Деформации измерялись бесконтактным методом путем цифровой обработки образов. Была подтверждена достоверность результатов измерений при погружении плоского жесткого зонда в песчаный грунт для определения его параметров при инженерно-геологических изысканиях.

### KEY WORDS

Plane deformation conditions; flat rigid probe; sand soil body; stress measurement; load cell; digital processing of images; deformation fields.

### ABSTRACT

The paper presents results of experimental research of the stress-strain state of a sand soil body during penetration of a flat rigid probe into it. The experiments were performed in the plane deformation conditions in a tray with transparent walls. The stresses from the dead weight of the soil were simulated by a load on the sand surface. The stresses in the soil body were measured by rigid pressure sensors. The deformations were measured by a noncontact method using digital processing of images. Reliability of measurement results at penetration of a flat rigid probe into sand soil for determination of its parameters during engineering-geological surveys was proved.

**Введение**

Дилатометрические зонды (наряду с прессиометрами) являются одними из немногих средств определения напряженного состояния грунтов в естественном залегании, в частности таких характеристик, как коэффициент бокового давления  $\xi$ , коэффициент анизотропии  $K_0$  и коэффициент переуплотнения OCR. Определять эти характеристики необходимо как для проведения инженерных расчетов оснований зданий и сооружений, так и для корректировки программ инженерно-геологических изысканий. Зондирование дилатометром также позволяет определять модули деформации грунтов, эквивалентные штамповым [4, 10].

Целями данного исследования были экспериментальное изучение напряженно-деформированного состояния модели массива песчаного грунта при погружении в него плоского жесткого зонда (дилатометра конструкции В.Ф. Сидорчука) [2, 6–8], оценка достоверности показаний датчика, расположенного в зонде, путем их сравнения с показаниями датчиков, находящихся в массиве грунта. При этом решались следующие задачи:

- определение минимально достаточного количества и схем расположения жестких датчиков давления (месдоз) [1] в массиве грунта для установления картин распределения напряжений в массиве в состоянии покоя и при внедрении в него жесткого зонда;
- физическое моделирование массива грунта путем послойной отсыпки песка в плоский лоток с уплотнением и одновременной закладкой месдоз;
- моделирование исходного состояния массива путем создания пригруза на его поверхности;
- проведение задавливания плоского жесткого зонда в массив;
- оценка напряженного состояния массива по показаниям месдоз, находящихся в грунте и в зонде;



Рис. 1. Стенд для испытаний в условиях плоской деформации

- оценка деформированного состояния массива методом цифровой обработки образов;
- анализ напряженно-деформированного состояния массива в процессе задавливания зонда и после релаксации напряжений при остановке зонда на заданной глубине.

Таблица

Физико-механические свойства исследуемого песка			
Характеристика	Значение	Метод определения	
Начальная плотность, г/см <sup>3</sup>	1,52	Отношение веса всего грунта из лотка после эксперимента к занимаемому им объему до эксперимента	
Коэффициент пористости, безразм.	начальный	0,750	Отсыпка при различной высоте и скорости с последующим взвешиванием
	максимальный	0,850	
	минимальный	0,563	
Угол внутреннего трения, град.	35	Трехосное сжатие по ГОСТ 12248	
Удельное сцепление, кПа	1		
Угол дилатансии, град.	4,7	Одноплоскостной срез	
Предельная деформация сдвига, %	4	Трехосное сжатие по ГОСТ 12248	
Модуль деформации, МПа, при боковом давлении, кПа	100	26	Трехосное сжатие по ГОСТ 12248
	200	38	
	300	67	

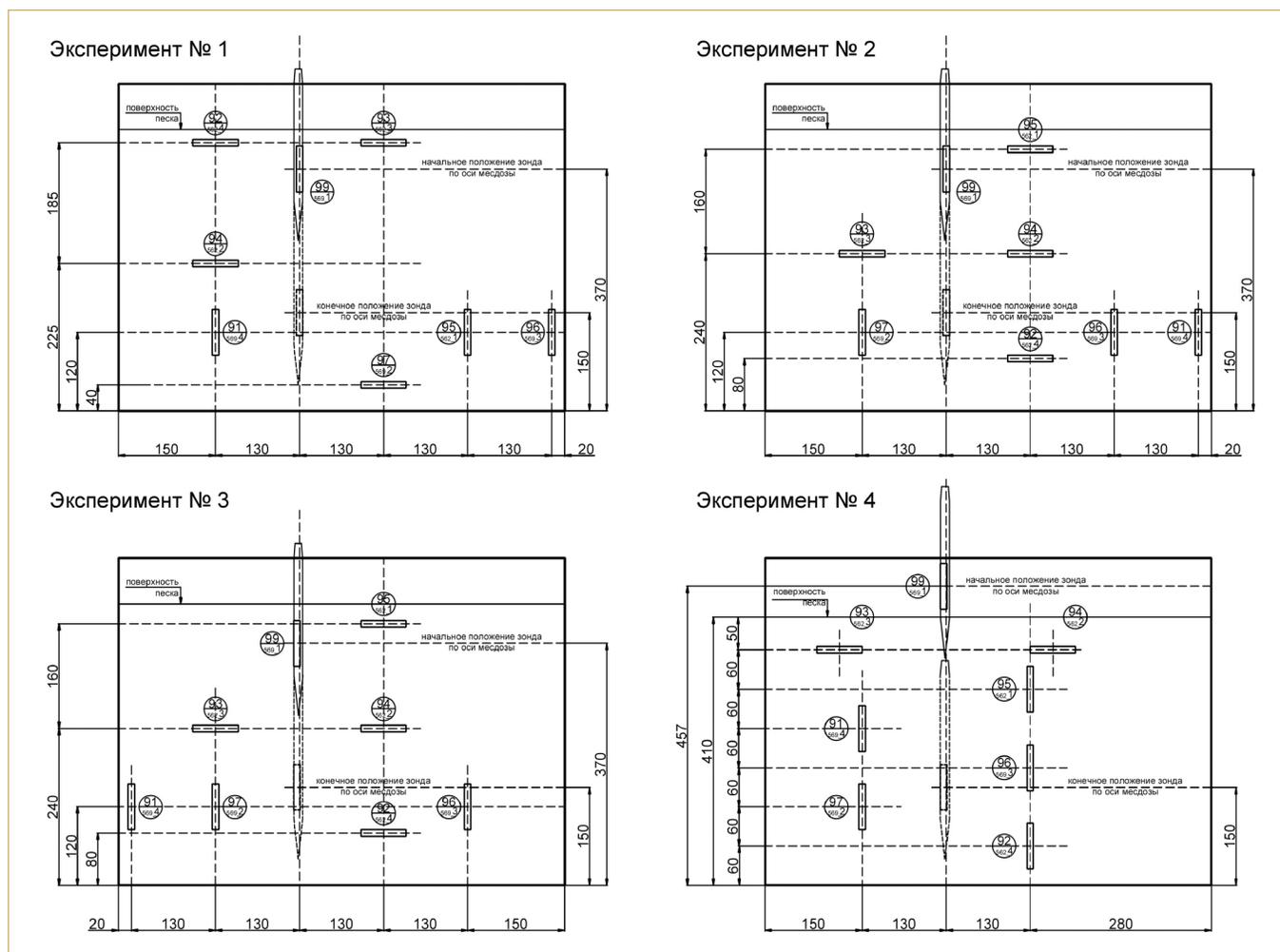


Рис. 2. Схемы раскладки мсдоз, начальное и конечное положение динамометрического зонда в вертикальном сечении модели песчаного массива в лотке. Мсдозы показаны в виде прямоугольников (рядом в окружностях над чертой указаны их заводские номера, под чертой — адрес в измерительной системе)

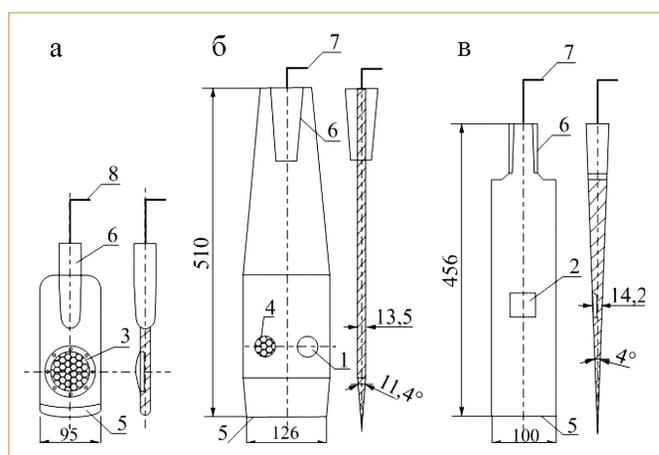


Рис. 3. Плоские зонды: а — дилатометр Маркетти; б — жесткий дилатометр; в — клиновидный дилатометр. Условные обозначения: 1 — мсдоза; 2 — тензометрический датчик; 3 — мембрана; 4 — датчик порового давления; 5 — вершина; 6 — держатель; 7 — кабель; 8 — пневмоэлектрокабель. Размеры указаны в миллиметрах

### Методика проведения испытаний

Для создания модели массива грунта использовался мелкий песок в воздушно-сухом состоянии. Песок укладывался в лоток для испытаний (описанный ниже) отсыпкой с постоянной высоты 10 см. Физико-механические свойства полученной модели представлены в таблице.

Испытания модели песчаного массива проводились в условиях плоской деформации с использованием автоматизированного стенда, разработанного в НПП «Геотек» (рис. 1), включавшего лоток с песком размером 720×480×155 мм и информационно-измерительную систему. Прозрачные стенки лотка были выполнены из закаленного стекла. Для исключения распора боковых стенок от бокового давления грунта они были усилены металлическими ребрами. Имитация напряжений от собственного веса грунта производилась с помощью пригруза на свободной поверхности массива песка двумя жесткими штампами. Нагрузка на штампы создавалась двумя пневмоцилиндрами, снабженными автоматическими регуляторами давления и манометрами.

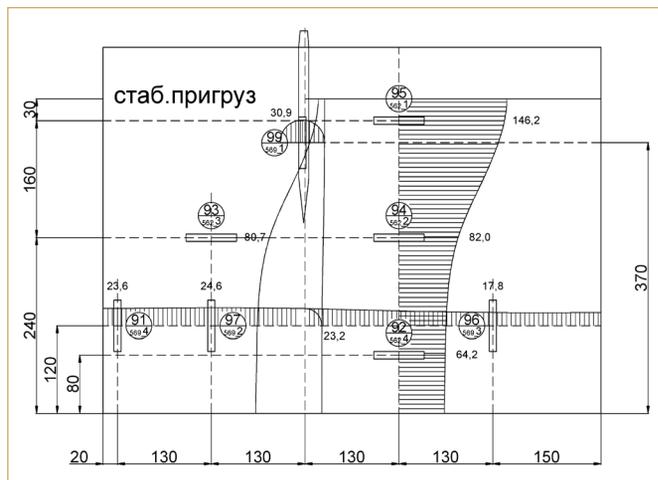


Рис. 4. Эпюры вертикального и горизонтального давления в грунте (кПа) после создания пригруза

В процессе отсыпки песка в него закладывались жесткие датчики давления (месдозы) [1] по схемам, представленным на рис. 2. Основное их преимущество по сравнению с датчиками иной конструкции заключается в том, что за счет применения гидропреобразователя жесткость датчика в десятки раз превышает жесткость грунта, в котором производятся измерения. Это значительно повышает точность определения давления в такой среде, как грунт.

Месдозы использовались для измерения изменений напряженного состояния песчаного массива, происходящих в процессе погружения зонда, и контроля величины и равномерности пригруза, имитирующего бытовое давление на глубину. Датчики были расположены так, чтобы контролировать вертикальное давление грунта у поверхности, на средней глубине и в нижней части массива. Горизонтальное давление измерялось по всей длине лотка в нижней трети толщи песка.

Для исследования был выбран зонд отечественной конструкции, предложенный В.Ф. Сидорчуком (МИСИ) [2, 6, 7]. Этот зонд отличается от других (рис. 3) высокой жесткостью встроенного датчика для измерения горизонтальных (боковых) напряжений в массивах не только песчаных и глинистых, но и крупнообломочных грунтов.

Нагружение зонда выполнялось кинематически — сервоприводом — с максимальной для данного сервопривода скоростью вертикального перемещения зонда, равной 0,42 мм/с. Начальное положение зонда выбиралось с таким расчетом, чтобы его ход в грунте составил 240 мм. Это с запасом обеспечило погружение месдозы, вмонтированной в зонд, в массив песка (см. рис. 2).

Вертикальная нагрузка контролировалась датчиком силы с диапазоном измерений до 50 кН и погрешностью для всего диапазона 0,5%. Для контроля скорости движения зонда использовался датчик перемещений с погрешностью измерений 0,1%.

Фотокамера Pentax-K30 (компания Ricoh, Япония) с разрешением 16 мегапикселей размещалась компланарно

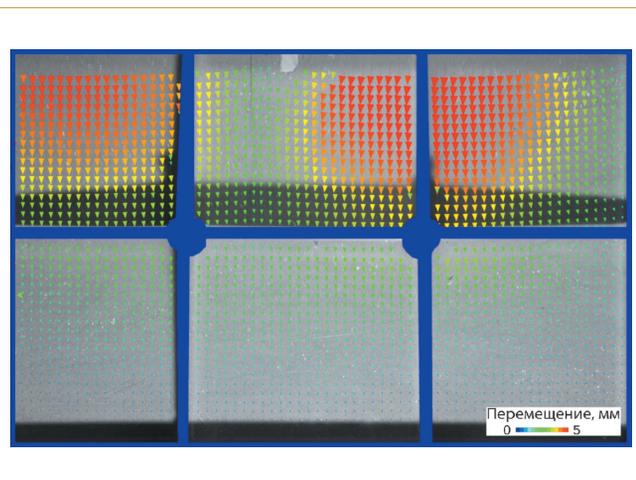


Рис. 5. Поля вертикальных перемещений в грунте, возникшие в ходе создания пригруза

прозрачной стенке лотка. Съемка выполнялась в автоматическом режиме через каждые 3 с (т.е. через каждые 1,25 мм перемещения зонда) с выдержкой (1/500) с. Размер полученных фотоснимков составлял 4928×3264 пикселей.

Для исследования характера деформирования массива песчаного грунта при внедрении в него плоского жесткого зонда был применен метод цифровой обработки образов [3]. Обработка результатов измерений выполнялась в программе PIVview (компания PIVTEC GmbH, Германия) [5, 9].

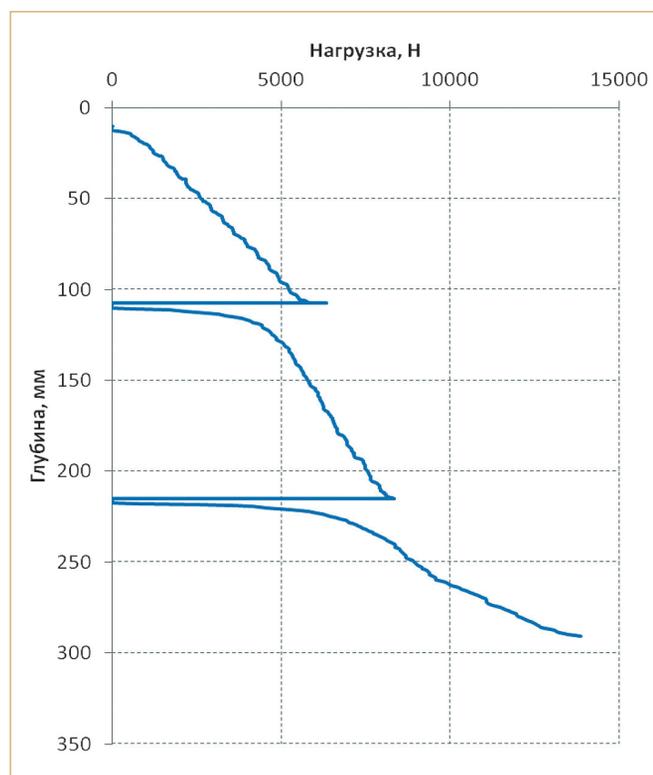


Рис. 6. Зависимость вертикальной нагрузки от глубины погружения зонда

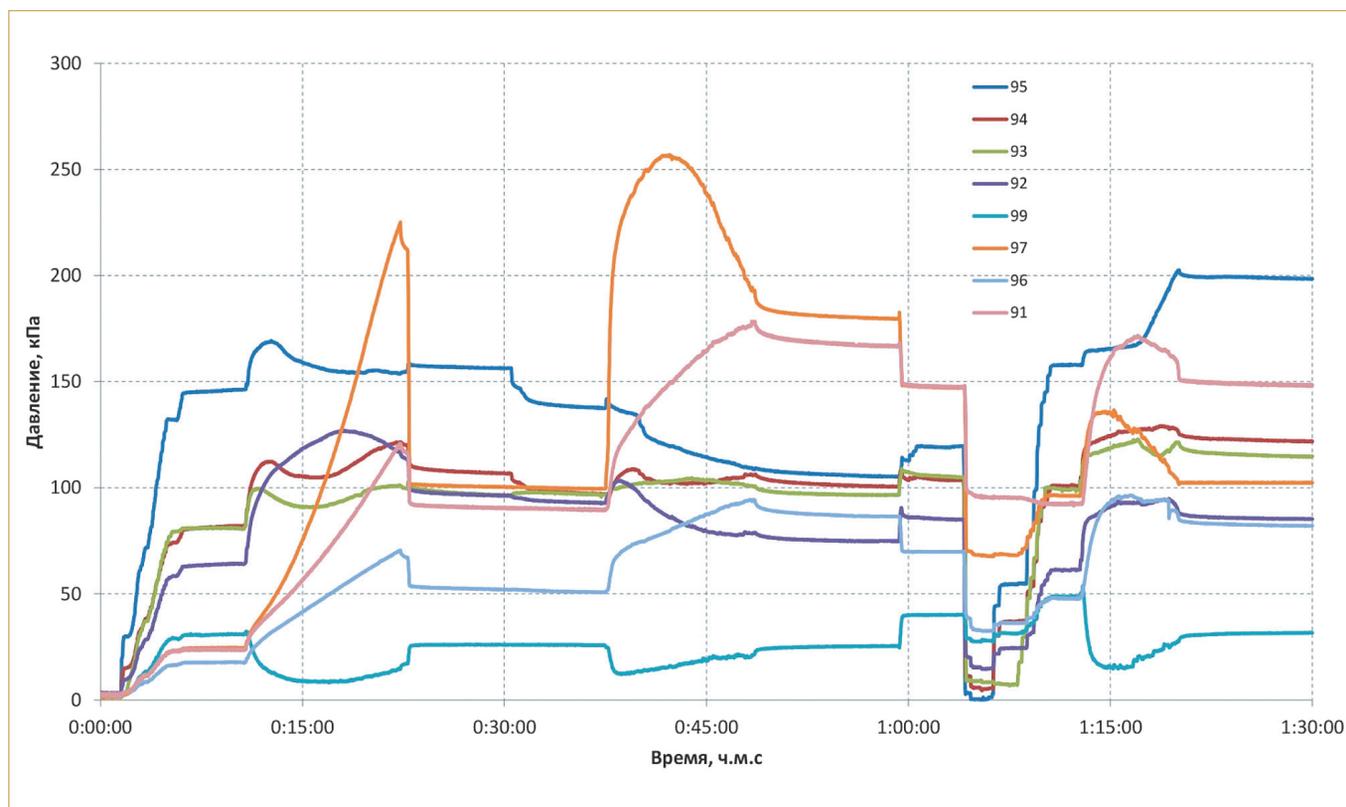


Рис. 7. Зависимости показаний мессдоз (кПа) от времени в процессе погружения зонда (номера в условных обозначениях соответствуют номерам мессдоз над чертой на рис. 2 и 4)

Для трансформации мест расположения пикселей в реальные физические координаты и учета сферичности изображений, получаемых с использованием фотокамеры, применялись маркеры, нанесенные на внутреннюю поверхность стеклянной стенки лотка. Точность измерения перемещений частиц грунта составила 0,01 мм.

Всего было выполнено четыре эксперимента с разными схемами раскладки мессдоз (рис. 2). Каждый из них выполнялся в следующей последовательности.

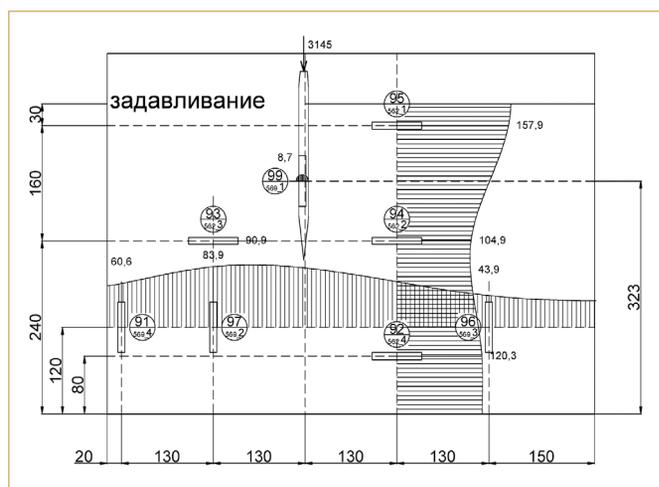


Рис. 8. Эпюры вертикального и горизонтального давления в грунте (кПа) в процессе задавливания под нагрузкой (Н)

Первоначально для имитации природного давления (напряжений от собственного веса грунта) с помощью пневмоцилиндров была создана пригрузка, равная 150 кПа, что соответствует бытовому давлению на глубине 10 м. Ее величину контролировали по показаниям манометров, исходя из предварительных расчетов. В процессе нагружения выяснилось, что эффективнее контролировать величину пригрузки по данным мессдоз (№ 93 94 на рис. 2), измеряющих вертикальное давление на глубине. Таким

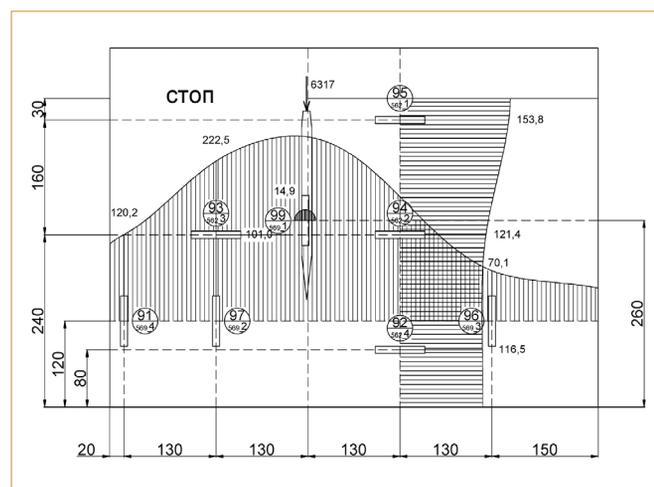


Рис. 9. Эпюры вертикального и горизонтального давления в грунте (кПа) при остановке под нагрузкой (Н)

образом была обеспечена постоянная величина пригруза, что косвенно подтвердилось практически равными величинами как вертикального давления в средней части лотка с обеих сторон от зонда, так и бокового давления по всей длине лотка в нижней трети массива грунта. Среднее отношение горизонтального давления к вертикальному примерно составило 0,32, что соответствует общепринятым представлениям о величине коэффициента бокового давления для песка.

### Результаты испытаний и их обсуждение

В процессе создания пригруза оценивался характер изменения напряженно-деформированного состояния в массиве песчаного грунта.

Эпюры вертикального и горизонтального давлений в грунте на этапе приложения вертикального пригруза после стабилизации деформаций представлены на рис. 4. Величины измеренных вертикальных давлений отложены от центров соответствующих месдоз вправо, горизонтальных — вверх, подписаны значения стабилизированных давлений, точки измерения соединены плавной кривой.

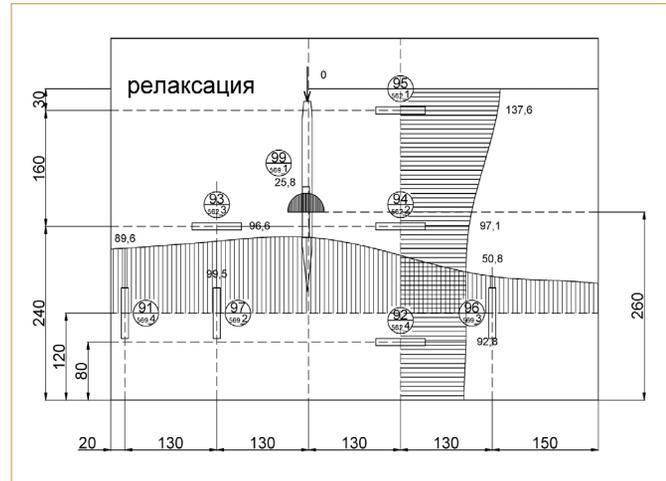


Рис. 10. Эпюры вертикального и горизонтального давления в грунте (кПа) при снятии нагрузки

Поля вертикальных перемещений представлены на рис. 5. Из него видно, что штампы, через которые передается нагрузка на грунт, довольно гибкие. Однако, несмотря на то что у поверхности вертикальные перемеще-

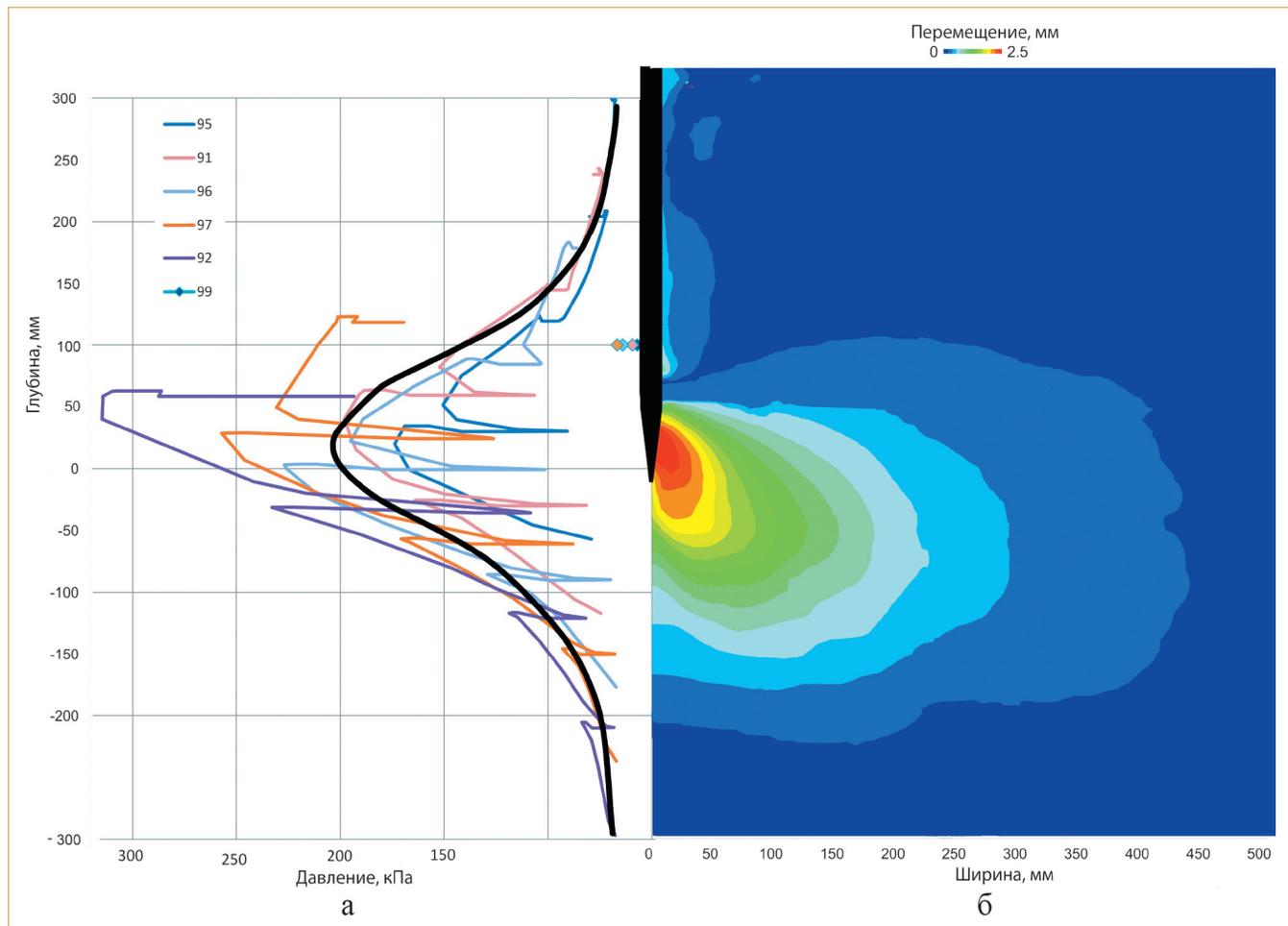


Рис. 11. Показания месдоз в момент прохождения около них задавливаемого дилатометра (точками обозначены показания дилатометра) (а) и изополя горизонтальных перемещений частиц грунта (б)

ния неоднородны по длине лотка, уже к середине глубины они выравниваются и на вертикально ориентированных среднезаглубленных месдозах (№ 93 и 94 в экспериментах 2 и 3) разница показаний составляет менее 2%.

На рисунке 6 представлен график зависимости перемещения зонда от нагрузки. Из-за ограниченности хода нагрузочного устройства и диапазона измерения датчика перемещений погружение зонда выполнялось в три этапа — по 110, 105 и 75 мм. Начальное и конечное положения зонда относительно расположения месдоз показаны на рис. 2. Из рисунка 6 видно, что с увеличением глубины погружения зонда усилие задавливания также растет, причем линейно. Это объясняется тем, что зонд погружен в массив не полностью, и в процессе его внедрения линейно растет площадь его контакта с грунтом, что и обуславливает рост сопротивления задавливанию.

На рисунке 7 приведены графики зависимости показаний месдоз от времени. На рисунках 8–10 представлены эпюры вертикального и горизонтального давлений в грунте

в процессе задавливания для первой проходки третьего эксперимента (как наиболее показательные). На рисунках 11–13 показаны результаты измерения полей перемещений в массиве песка в процессе погружения в него зонда, а на рис. 14, 15 — вычисленные деформации сдвига и объема.

Анализ данных, представленных на рисунках 7–11, свидетельствует о том, что при погружении зонда вокруг его острия создается зона повышенных напряжений (как вертикальных, так и горизонтальных), уплотняющих и раздвигающих грунт. Эта зона погружается вместе с зондом, опережая его примерно на 1–2 длины острия и распространяясь на такое же расстояние от него в поперечном направлении. Непосредственно в процессе задавливания показания датчика давления в дилатометре существенно меньше, чем горизонтальное давление, измеренное месдозами в массиве грунта. После остановки задавливания грунт обжимает дилатометр и показания его датчика растут. При этом в массиве происходит релаксация напряжений и показания месдоз уменьшаются.

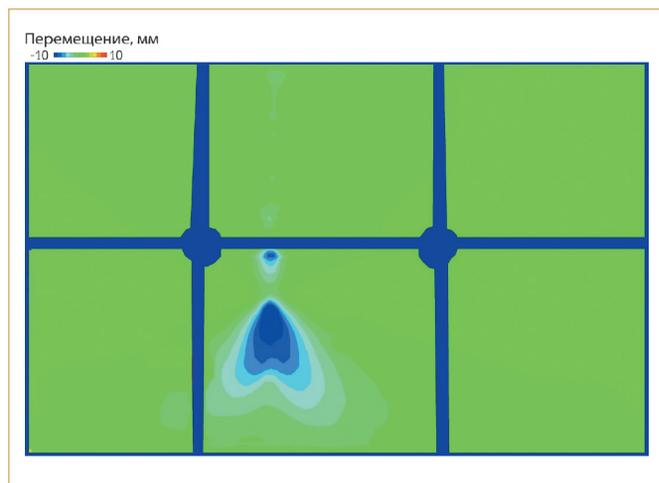


Рис. 12. Поля вертикальных перемещений грунта в лотке при погружении зонда на третьем этапе

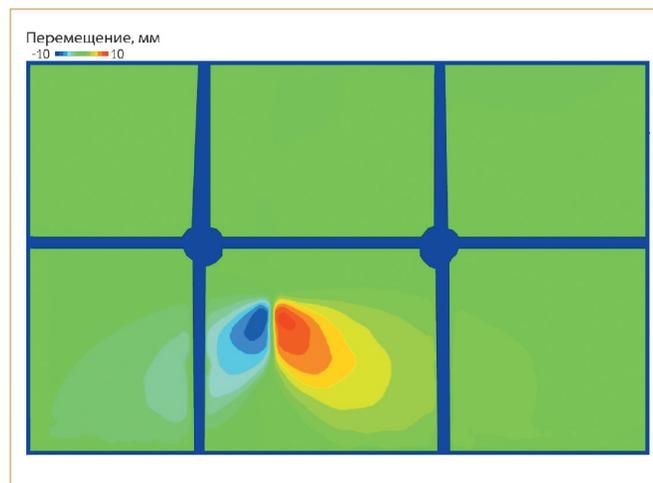


Рис. 13. Поля горизонтальных перемещений грунта в лотке при погружении зонда на третьем этапе

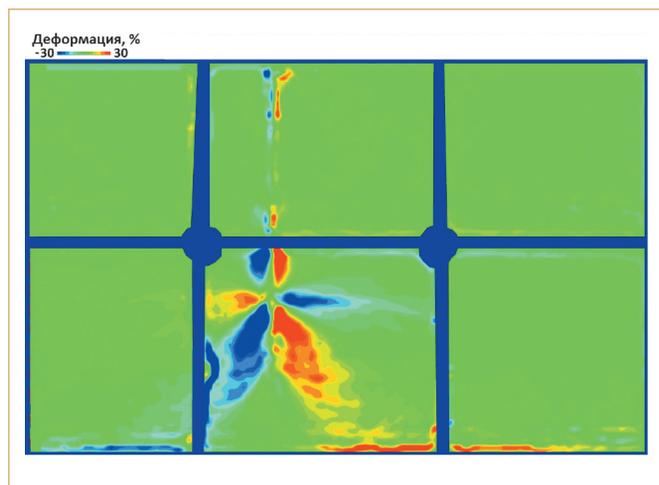


Рис. 14. Поля деформаций сдвига грунта в лотке при погружении зонда на третьем этапе

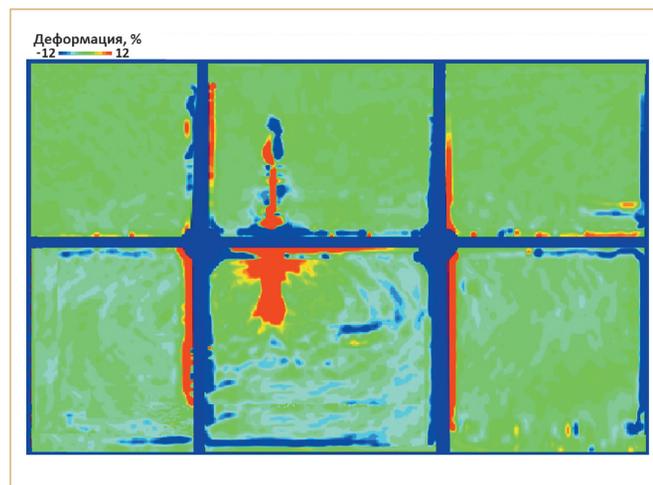


Рис. 15. Поля объемных деформаций грунта в лотке при погружении зонда на третьем этапе

На рисунках 11–13 показаны изополя перемещений частиц грунта, определенные методом цифровой обработки образов. Видно, что распределения деформаций и давлений имеют одинаковый характер. То есть качественные картины распределения напряжений и деформаций, полученные независимо друг от друга принципиально различными методами, совпадают.

Как видно из сравнения рис. 15 и рис. 14, в песке наблюдается расширение по направлению деформаций сдвига. При этом объемные деформации расширения имеют место не только под острием зонда, но и в зонах, примыкающих к его боковой поверхности.

Результаты измерений показали, что при погружении зонда в исследуемую модель массива песка происходит значительное падение вертикального давления (напряжений) с глубиной. Это может быть вызвано одновременно как наличием арочного эффекта, так и трением грунта о поверхность стенок лотка. В любом случае уменьшение вертикального давления свидетельствует о недопустимости оценки созданного пригрузом бытового давления по показаниям датчиков, расположенных на поверхности, без измерений с использованием датчиков, расположенных в массиве грунта на интересующей глубине.

Наблюдалось также падение бокового давления при задавливании зонда в песчаный грунт по данным измерений месдозой, вмонтированной в зонд.

Во всех опытах был выявлен прогрессирующий характер развития деформаций в массиве песка в процессе погружения в него жесткого зонда. Максимум деформаций сдвига и объема наблюдался в районе острия зонда.

В значительно меньшем объеме они были отмечены на его боковой поверхности.

### Выводы

1. Распределения напряжений и деформаций в физической модели массива грунта при задавливании жесткого дилатометра были исследованы независимо друг от друга двумя различными методами (напряжения измерялись непосредственно в массиве грунта жесткими датчиками давления, деформации определялись дистанционно методом цифровой обработки образов) и дали качественно сходные результаты.

2. При погружении зонда в массиве создаются дополнительные напряжения и локальные разрушения грунта непосредственно вблизи острия зонда, искажающие исходную картину напряженно-деформированного состояния массива. Зона уплотненного грунта движется перед зондом, опережая его на 1–2 длины острия и на столько же распространяясь в поперечном направлении.

3. Значения горизонтального давления в грунте, определенные по показаниям дилатометра после его остановки на заданной глубине и релаксации напряжений, могут быть использованы для оценки исходного напряженного состояния массива.

4. Данные зондирования плоским жестким дилатометром в натуральных условиях могут быть использованы для оценки природного напряженно-деформированного состояния грунта, для вычисления коэффициентов бокового давления покоя, коэффициента Пуассона, степени перуплотнения грунта, а также для оценки степени анизотропии механических характеристик грунта. ■

### Список литературы

1. Баранов Д.С. Тензометрические приборы для исследования строительных конструкций. М.: Изд-во ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1971.
2. Баранов Д.С. Устройство для зондирования грунта: патент СССР № 400837 / Бюллетень изобретений № 40. М.: База патентов СССР, 1973.
3. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2010.
4. ГОСТ 20276-2012. Полевые методы определения характеристик прочности и деформируемости. М.: МНТКС, 2012.
5. Мельников А.В., Новичков Г.А., Болдырев Г.Г. Исследование деформированного состояния песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов // Геотехника. 2012. № 1. С. 28–41.
6. Сидорчук В.Ф. Исследование и усовершенствование прямого метода измерения давлений в грунтах: автореф. дис. ... канд. тех. наук. М.: Изд-во НИИОСП, 1971. 20 с.
7. СТП МИСИ 9201294-90 (стандарт предприятия МИСИ им. В.В. Куйбышева). Методика выполнения измерений давления в природном грунтовом массиве / В.Ф. Сидорчук, М.В. Егоров. М.: Изд-во МИСИ, 1990. 28 с.
8. Boldyrev G., Guskov I., Lavrov S., Sidorchuk V., Skopintsev D. Comparison of soil test data, obtained with different probes / Proceedings of the 3-d International Conference on the Flat Dilatometer. Volume 3. Rome, 2015. URL: [http://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/papers%20DMT%202015%20\(pdf\)/17.pdf](http://www.marchetti-dmt.it/conference/dmt15/papers%20DMT%202015%20(pdf)/17.pdf).
9. Boldyrev G.G., Melnikov A.V., Barvashov V.A. Particle image velocimetry and numeric analysis of sand deformations under a test plate // Proceedings of the 5-th European Geosynthetics Congress. Volume 1. Valencia, Spain, 2012. P. 685–691.
10. ISO 22476-11:2005. Geotechnical investigation and testing. Field testing. Part 11. Flat dilatometer test. Geneva, Switzerland: ISO, 2005.