

Исследование деформированного состояния песчаного основания с использованием метода цифровой обработки образов

Investigation of sand base deformity using the method of digital processing of images

МЕЛЬНИКОВ А.В.

Студент магистратуры кафедры оснований и фундаментов Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза

НОВИЧКОВ Г.Г.

Студент магистратуры кафедры оснований и фундаментов Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, г. Пенза

БОЛДЫРЕВ Г.Г.

Профессор кафедры оснований и фундаментов Инженерно-строительного института Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, член Российского национального комитета по механике грунтов и фундаментостроению, технический директор ООО «НПП «Геотек»», д.т.н, г. Пенза, g-boldyrev@geotek.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Фотограмметрия; фотофиксация; рентгенография; цифровая обработка образов; модель штампа; песчаное основание; характер деформации.

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты опытов по исследованию характера деформации песчаного основания, нагруженного жестким штампом, с использованием метода цифровой обработки образов. Выявлен прогрессивный характер развития деформаций сдвига и объема с ростом внешней нагрузки.

MELNIKOV A.V.

A graduate student of the beds and foundations department of the Civil Engineering Institute of Penza State University of Architecture and Construction, Penza

NOVICHKOV G.G.

A graduate student of the beds and foundations department of the Civil Engineering Institute of Penza State University of Architecture and Construction, Penza

BOLDYREV G.G.

A professor of the beds and foundations department of the Civil Engineering Institute of Penza State University of Architecture and Construction, a member of the Russian National Committee for Soil Mechanics and Foundation Engineering, the technical director of the «NPP Geotek» Ltd, Penza, g-boldyrev@geotek.ru

KEY WORDS

Photogrammetry; photofixation; roentgenography; digital processing of images; a stamp model; sand base; deformation behavior.

ABSTRACT

The article presents experimental results on investigation of the deformation character of the sand base loaded by a rigid stamp using the method of digital processing of images. The progressive character of development of shear and volume deformations with increasing external load is revealed.

Одним из методов исследований характера деформации оснований является метод фотофиксации траекторий перемещений частиц, предложенный русским инженером В.И. Курдюмовым в 1889 году [7] и развитый в дальнейшем в работах М.В. Малышева [8] и др. Изображение характера деформации песчаного основания при его нагружении плоским жестким штампом, полученное с использованием указанного метода, представлено на рис. 1.

В развитие метода фотофиксации авторы работы [17] предложили использовать рентгенографию для количественного определения деформаций в массиве основания. Для этой цели они закладывали свинцовые дробинки внутрь массива и, используя рентгеновское излучение, просвечивали грунт с фиксацией положения этих дробинок на различных ступенях нагружения.

Позднее Г.Г. Болдырев и Е.В. Никитин [3] использовали метод фотограмметрии для определения деформаций в массиве песчаного основания. В проведенных ими опытах по двум последовательным фотоснимкам определялись приращения перемещений марок, расположенных в узлах элементов, в направлениях осей X и Y с помощью метра Женевского с точностью до 0,2 мм. На рисунке 2 показаны изолинии равных относительных деформаций сдвига в основании полосового штампа, наблюдаемые в предельном состоянии. Видно, что деформации сдвига прогрессивно развиваются по направлению от края

штампа к свободной поверхности основания, причем наблюдается область 1, в которой нет деформаций сдвига.

В 2001 году авторы работы [19] предложили использовать технологию цифровой обработки образов для измерения деформаций грунта в основаниях моделей фундаментов с использованием метода PIV (Particle Image Velocimetry). PIV— это метод обработки изображений для получения полей перемещений. Он является безопасным по сравнению с рентгенографией и менее трудоемким по сравнению с фотограмметрией, поэтому его стали широко применять при проведении модельных исследований.

Первоначально PIV как метод измерения скоростей был предложен в статье [12] для использования при исследованиях в области механики жидкостей и газов. Авторы работы [19] впервые использовали модифицированный подход для реализации системы PIV в геотехнических исследованиях. В данной области метод PIV сейчас применяется в таких случаях, когда есть возможность использовать фотокамеру для съемки деформируемых поверхностей, — при испытаниях в условиях плоской деформации в лотках с различными штампами, с армированными основаниями [13], с моделями свай [15], при испытаниях в приборах трехосного сжатия [14, 18 и др.].

PIV-метод основан на измерении перемещений частиц при последовательном анализе изображений. Алгоритм его работы показан на рис. 3. В данном ме-

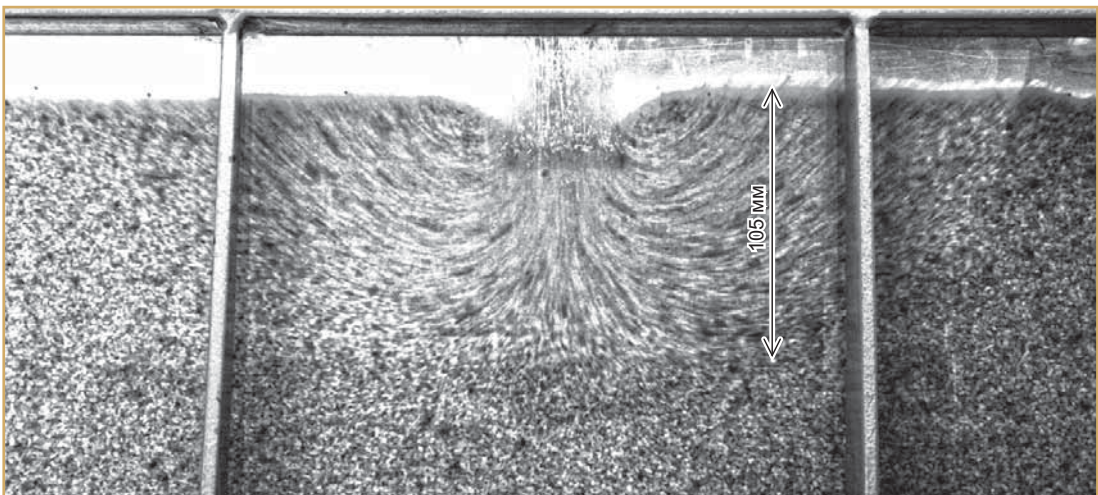


Рис. 1. Траектории перемещений частиц

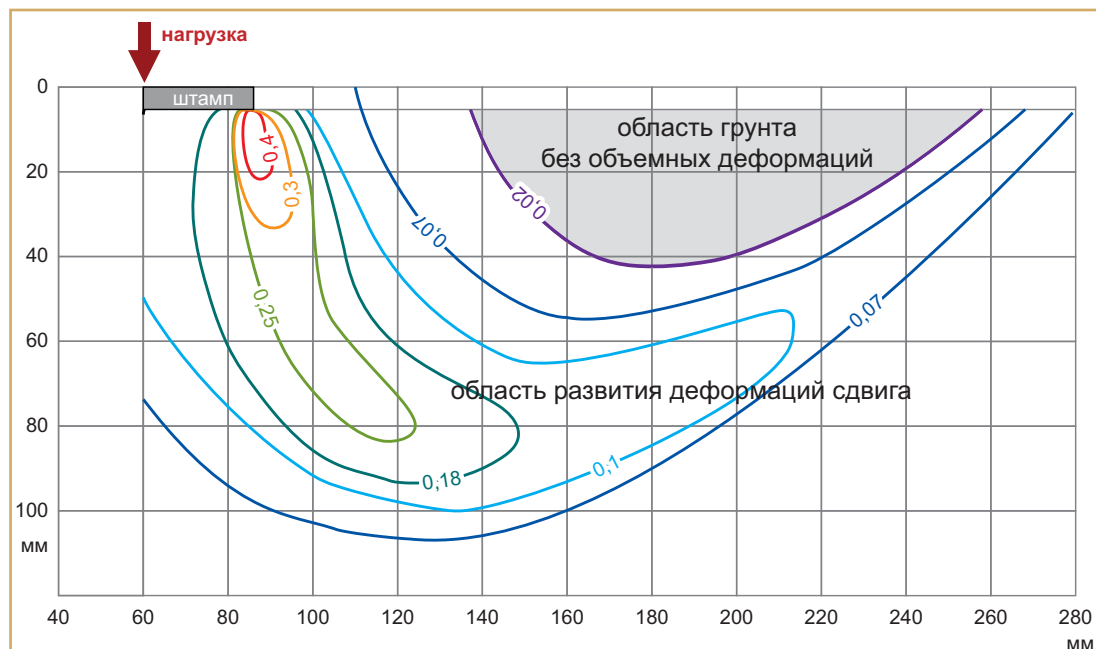


Рис. 2. Изолинии относительных деформаций сдвига [3]: 1 — область грунта без объемных деформаций; 2 — область развития деформаций сдвига; 3 — штамп; 4 — нагрузка

тоде применяется кросскорреляционный алгоритм — когда начальные и конечные положения частиц фиксируются на разных снимках.

Сущность кросскорреляционного подхода заключается в следующем. Имеются два изображения (снимка), полученные на разных ступенях нагрузки. Каждое из них разбивается на элементарные (расчетные) области, или ячейки, размером $L \times L$ пикселей. Интенсивность света, отраженного от частиц и зарегистрированного камерой, можно представить дискретной функцией двух переменных — x и y . Для первого и второго кадров это будут соответственно функции $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$.

Рассчитывается корреляционная функция, для чего используется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье с применением корреляционной теоремы. Максимум этой функции указывает на то, что два изображения материальной точки перекрывают друг друга. Это соответствует наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. Для более точного определения координат максимума используется попиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестностях ее максимума. Интерполяция может проводиться независимо по обеим координатам. Интерполирующая функция может быть

различной (например, полином второй степени или гауссиан). Координатой максимума считается координата максимума интерполирующей функции. Обычно бикубическая интерполяция корреляционной функции позволяет (в зависимости от алгоритмов обработки) получить для кросскорреляционного алгоритма точность 0,1 пикс., а при использовании итерационных методов (например, с переразбиением изображения для перехода от элементарных областей 64×64 пикс. к ячейкам 32×32 пикс.) добиться точности 0,03 пикс.

При разбиении изображения на элементы мелкая сетка дает большее число точек измерения. В то же время снижается точность из-за увеличения числа случайных векторов, а также становится невозможным определять большие перемещения. В качестве оптимального варианта, подобранного опытным путем, авторами настоящей статьи была принята сетка с ячейками размером 12×12 пикс., при использовании которой перемещения определяются в точках через каждые 12 пикселей (или 2,14 мм при переводе в физические координаты). Эмпирическое уравнение, полученное в работе [19], позволяет приближенно оценить случайные ошибки метода p_{pix} (пикс.):

$$p_{pix} = (0,6 / L) + (150000 / L_2), \quad (1)$$

где L — сторона элементарной области (ячейки), пикс.

Для сетки с размером ячейки 12×12 пикс. величина p_{pix} составляет 0,05 пикс.

В ООО «НПП «Геотек»» были проведены испытания модели ленточного фундамента в условиях плоской деформации. Целью этих исследований являлось экспериментальное изучение деформированного состояния песчаного массива, нагруженного вертикальной нагрузкой через жесткий штамп, в условиях плоской деформации. Для этой цели ис-

пользовался автоматизированный стенд (рис. 4), включавший лоток размером $720 \times 480 \times 155$ мм. Стенки лотка были светопрозрачными, выполненными из оргстекла. Для исключения распора боковых стенок от давления грунта они были усилены металлическими ребрами.

Нагрузка на жесткий штамп шириной 50 мм и длиной 155 мм передавалась через загрузочный шток от пневматического устройства нагружения. Для автоматизированного управления процессом нагружения и отображения результатов испытаний использовалась программа Geotek-Foundation (ООО «НПП «Геотек»»). Снимки были получены цифровой фото-

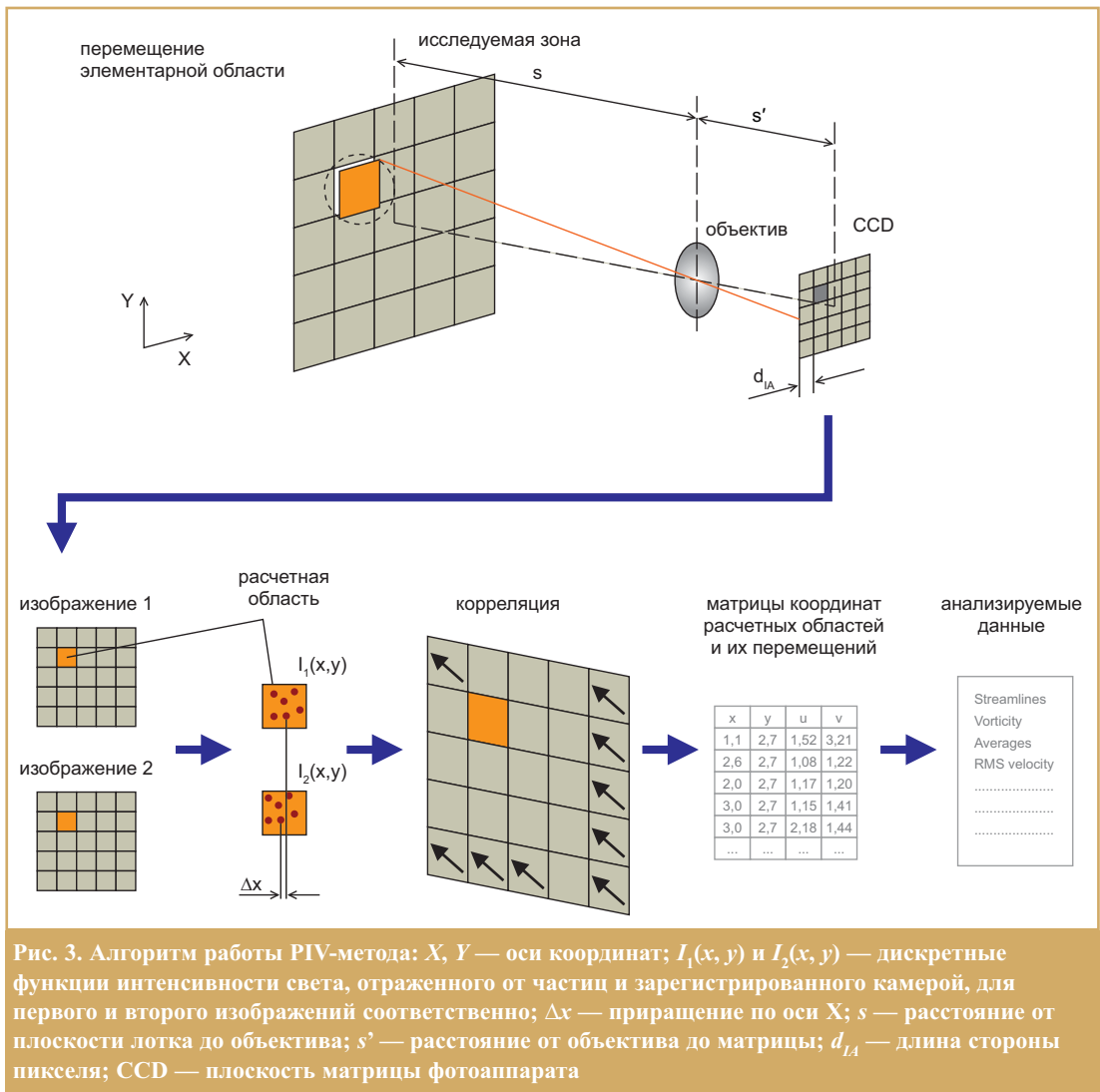


Рис. 3. Алгоритм работы PIV-метода: X, Y — оси координат; $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ — дискретные функции интенсивности света, отраженного от частиц и зарегистрированного камерой, для первого и второго изображений соответственно; Δx — приращение по оси X ; s — расстояние от плоскости лотка до объектива; s' — расстояние от объектива до матрицы; d_{IA} — длина стороны пикселя; CCD — плоскость матрицы фотоаппарата



Рис. 4. Автоматизированный стенд для испытаний моделей фундаментов

камерой Canon EOS 400D с разрешением 2592×3888 пикс. и матрицей 10 Мп. Камера размещалась на расстоянии 2,5 м от лотка перпендикулярно его прозрачной стенке и подключалась к компьютеру посредством кабеля USB. Фотосъемка на каждой ступени нагружения производилась автоматически программой Geotekc-Foundation без прикосновений к камере с целью исключения ее смещения.

Плоскость лотка была точно установлена параллельно плоскости CCD (матрице фотоаппарата), но все же в случае короткого фокусного расстояния камеры изображение выходило «сферичным». Для преодоления этой проблемы использовались контрольные маркеры. На внутренней поверхности прозрачной стенки лотка было нанесено 9 целевых маркеров диаметром 1 мм (рис. 5). Они использовались для трансформации координат из пикселей изображения в реальные физические координаты. Эти маркеры позволили в процессе трансформации учесть «сферичность» изображений, получаемых фотокамерой. Отметим, что в ра-

боте [20] для этого был предложен более сложный способ калибровки с использованием обучаемых нейронных сетей.

В качестве основания использовался чистый кварцевый песок со следующим гранулометрическим составом:

Размер частиц, мм	Содержание частиц по массе, %
< 0,25	0,1
0,25–0,5	0,2
0,5–1,0	1,9
1,0–2,0	60,9
2,0–3,0	36,9

Согласно ГОСТ 12536-79 [6] данный грунт характеризуется как песок гравелистый средней плотности. По результатам его испытаний в условиях трехосного сжатия по ГОСТ 12248-96 [5] были получены значения угла внутреннего трения ($\varphi = 37^\circ$), коэффициента Пуассона ($\mu = 0,31$) и модуля деформации:

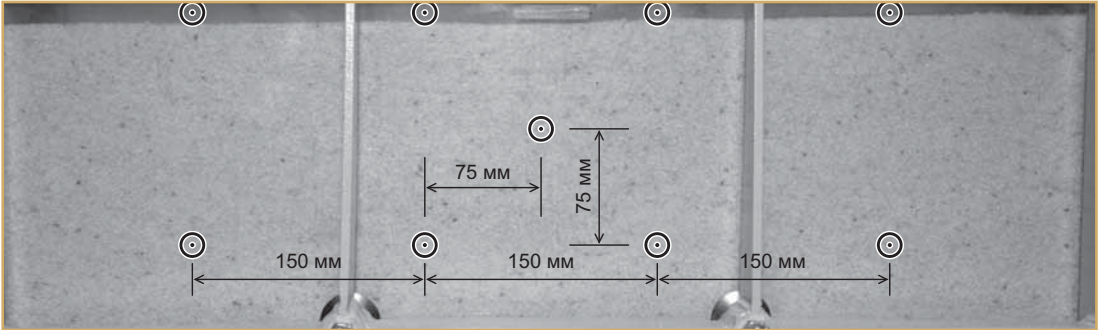


Рис. 5. Расположение целевых маркеров на стенке лотка

Всестороннее давление, кПа	Модуль деформации, МПа
30	22
100	49
200	81
300	105,0

С использованием зависимости «деформация сдвига — девиатор напряжений» (рис. 6) было найдено предельное значение относительной деформации сдвига $\gamma_{пр} = 0,04$. Как видно из рис. 6, величина $\gamma_{пр}$ практически не зависит от всестороннего давления.

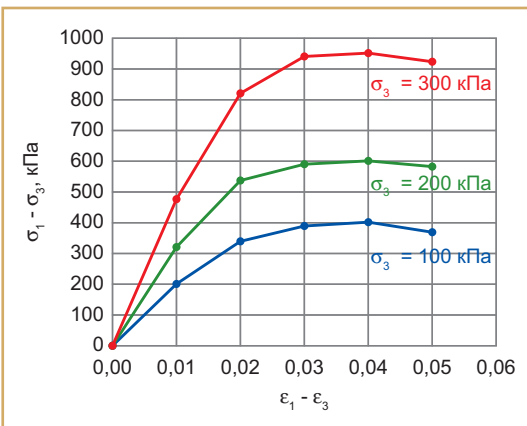


Рис. 6. График зависимости относительной деформации сдвига от девиатора напряжений: σ_1, σ_3 — максимальное и минимальное главные напряжения соответственно; ϵ_1, ϵ_3 — соответствующие главные деформации; $(\sigma_1 - \sigma_3)$ — девиатор напряжений; $(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ — деформация сдвига

Песок в лоток укладывался отсыпкой с постоянной высотой 10 см и уплотнялся заданным давлением с использованием загрузочного устройства и плоского штампа, равного по площади поперечному сечению лотка. Плотность сложения песка ρ составляла 1,59 г/см³ (она определялась взвешиванием всего песка, находящегося в лотке). Коэффициент пористости e был равен 0,502.

На рисунке 7 показан график зависимости осадки штампа от давления под его подошвой. Цифрами на этом графике отмечены ступени нагрузки, для которых проводился анализ методом PIV. Точка 1 соответствует окончанию фазы уплотнения [11]. Деформации грунта в этой фазе линейно зависят от давления под подошвой штампа. В следующей фазе (точка 2) происходит развитие зон сдвигов и зависимость между деформациями и напряжениями становится нелинейной. Под штампом сформировалось жесткое грунтовое ядро, которое начинает разжимать грунт

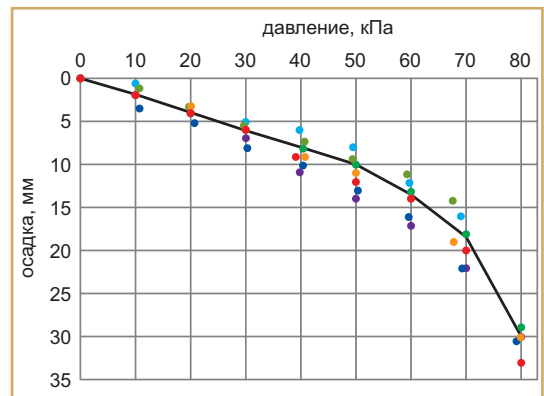


Рис. 7. Зависимость осадки штампа от нагрузки и точки анализа с помощью метода PIV

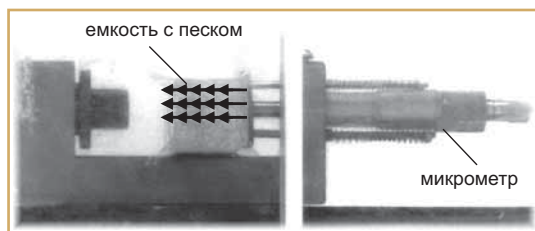


Рис. 8. Устройство для определения точности измерений по методу PIV

в стороны, обуславливая значительные осадки штампа. Последняя фаза — фаза выпора (точка 3), в которой формируются непрерывные поверхности сдвига, в результате чего песчаное основание теряет устойчивость.

В результате обработки фотографий по методу PIV были получены: векторы перемещения частиц, перемещения частиц по вертикальному и горизонтальному направлениям, относительные деформации сдвига и объема. Относительная деформация сдвига определялись по формуле ϵ_s , а относительная деформация объема — из выражения ϵ_v (где ϵ_x, ϵ_y — относительные деформации по осям x и y соответственно; на рис. 6 и далее в статье они приводятся в относительных величинах).

Для улучшения качества обработки изображений применялись следующие инструменты [16]:

- 1) гауссиан-окно для эффективного уменьшения случайных корреляций, связанных с эффектом «потери пары» на границе области;
- 2) частотная фильтрация корреляционной функции (фильтр Low-pass) для отсекающей небольшой ча-

сти низких частот и эффективного удаления высоких частот из спектра корреляционной функции;

3) бикубическая интерполяция для попиксельной интерполяции при поиске максимума на корреляционной плоскости;

4) итерационные методы для повышения сходимости результатов обработки и увеличения точности получаемых данных;

5) фильтр Median (осредняющий) для коррекции ошибок для выявления и исправления ошибочных векторов.

Для определения точности нахождения перемещений было применено устройство, представленное на рис. 8, которое устанавливалось за прозрачной стенкой лотка. Фотокамера находилась в том же положении, что и в последующих опытах. С помощью микрометра задавались перемещения емкости с песком. Одновременно эти перемещения измерялись с помощью метода PIV.

Эксперимент показал, что перемещения определялись с точностью до 0,1 мм, что значительно хуже точности самого метода PIV. Это было связано с такими факторами, как: трение песка о поверхность стекла, непостоянная фокусировка фотокамеры, ее колебания, изменения освещенности, наличие локальных градиентов смещения, погрешности в нанесении контрольных маркеров и определении их центров, несовершенство функции, трансформирующей пиксельные координаты в физические, и др.

На рисунке 9 показаны векторы перемещений частиц, построенные программой PIVview как

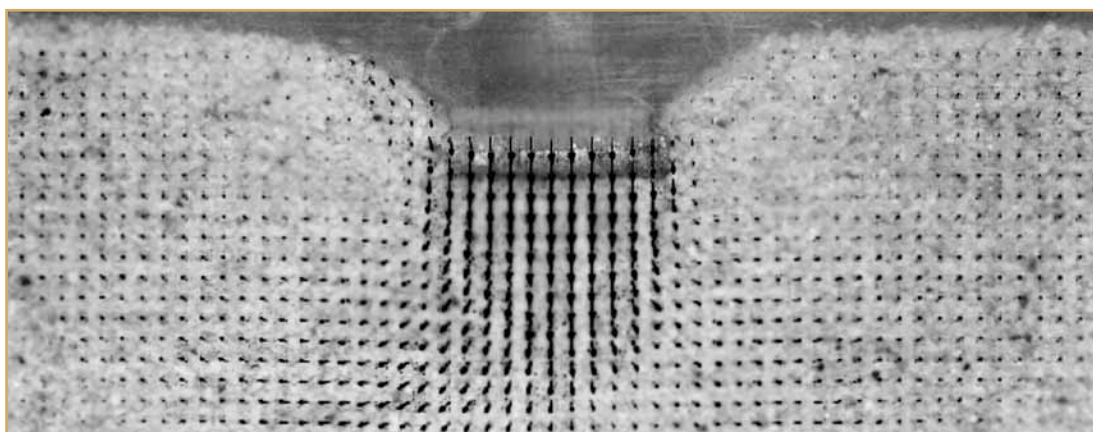


Рис. 9. Векторы перемещений частиц, построенные программой PIVview (<http://www.pivtec.de>)

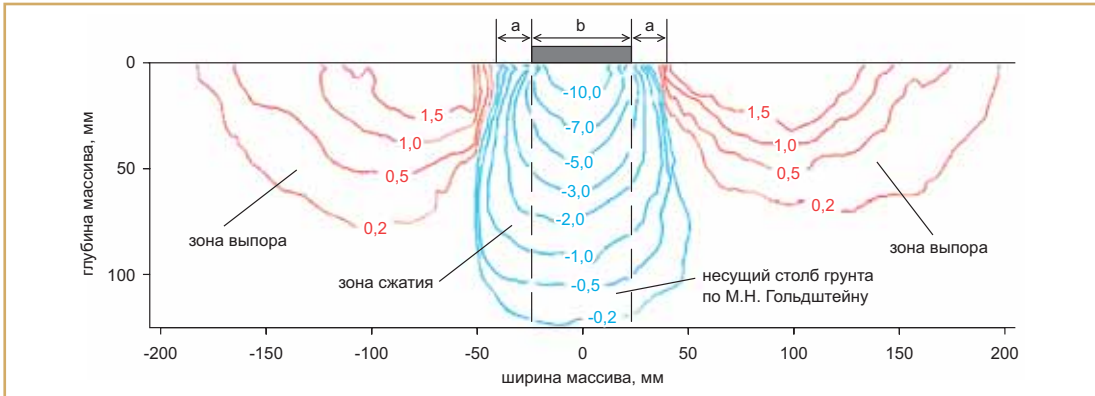


Рис. 10. Изолинии вертикальных перемещений, мм, при осадке штампа 10,1 мм: 1 — зона сжатия; 2 — зона выпора; 3 — несущий столб грунта по М.Н. Гольдштейну [4]; *a* — опускание свободной поверхности, *b* — ширина штампа

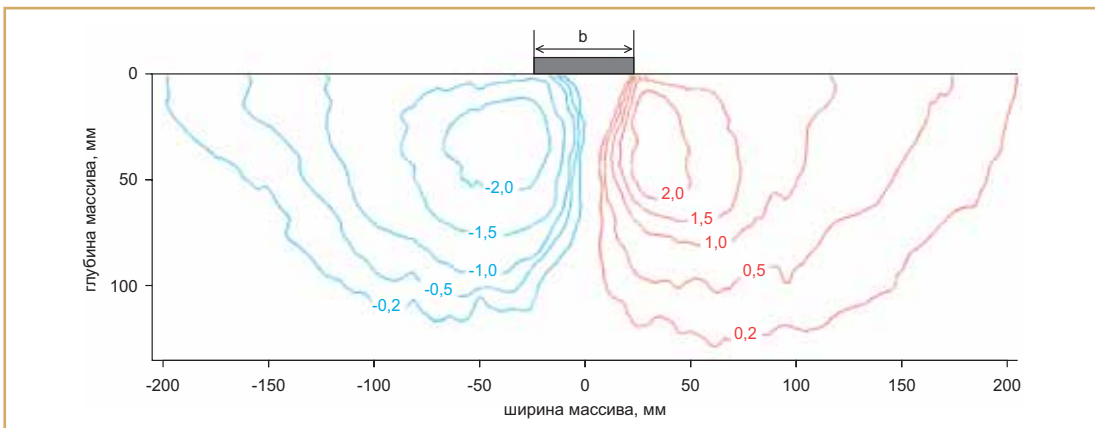


Рис. 11. Изолинии горизонтальных перемещений, мм, при осадке штампа 10,1 мм: *b* — ширина штампа, равная 50 мм

$\sqrt{(dx^2 + dy^2)}$ (где dx и dy — перемещения расчетных областей по направлениям соответствующих осей). На рисунках 10–21 показаны изолинии перемещения частиц по вертикальному и горизонтальному направлениям, относительные деформации сдвига и объема.

С ростом осадки штампа увеличивается глубина зоны деформаций. Например, вертикальное перемещение величиной 0,2 мм при ширине штампа b произойдет:

На глубине, мм	При осадке штампа, мм
b	1,0
$2,3b$	10,1
$2,6b$	13,7
$3,7b$	28,8

На рисунке 12 показана схема деформации основания, предложенная М.Н. Гольдштейном [4]. Как и в опытах с использованием метода PIV (см. рис. 10, 18), под штампом имеется зона уплотнения, имеющая определенную глубину развития. Следует иметь в виду, что «грунтовое ядро» находится внутри зоны уплотнения и примыкает к подошве штампа. Эта зона была названа М.Н. Гольдштейном «несущим столбом». В выполненных опытах глубина ее развития возрастает с ростом внешней нагрузки. При нагрузке, соответствующей завершению фазы уплотнения, она равна 120 мм. Величина вертикального перемещения на нижней границе зоны уплотнения равна 0,2 мм, что составляет 1,98% от осадки штампа. В предельном состоянии, при нагрузке 80 кПа, глубина развития этой зоны равна 185 мм при тех же пере-

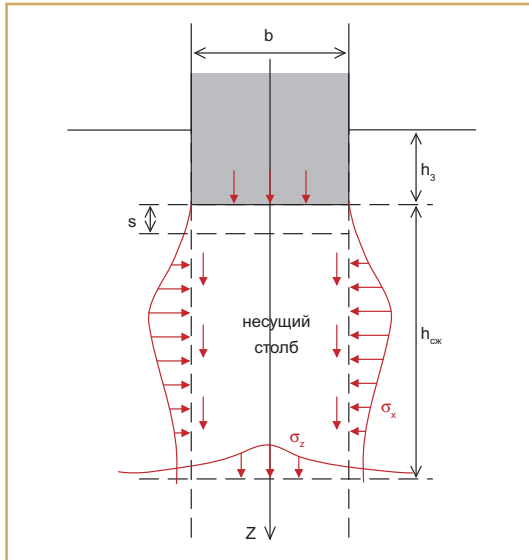


Рис. 12. Несущий столб грунта [4]:
b — ширина фундамента; *Z* — вертикальная ось; *s* — осадка; *h₃* — глубина заложения; *h_{ск}* — глубина сжатия; σ_z — вертикальные напряжения; σ_x — горизонтальные напряжения

мещениях на ее нижней границе, равных 0,2 мм, что составляет уже 0,69% от осадки штампа. Это говорит о том, что, несмотря на рост деформаций сдвига, с

ростом внешней нагрузки продолжается процесс уплотнения песка в пределах несущего столба по его глубине. Кроме того, форма несущего столба изменяется и превращается в каплевидную (см. рис. 18). Если сравнить рис. 1 и 18, то можно увидеть, что видимые траектории перемещений частиц песка ограничиваются глубиной развития 105 мм, а глубина зоны уплотнения составляет 185 мм. Это приводит к выводу о том, что зоны сдвига пересекают несущий столб в его верхней части.

Следует отметить, что вопрос назначения глубины сжатия грунта является до сих пор неопределенным и условным. Согласно СНиП 2.02.01-83* [9] глубина сжатия находится из условия равенства вертикальных напряжений от нагрузки:

$$\sigma_{zp} = 0,2\sigma_{zg} \quad (2)$$

где σ_{zp} — дополнительное вертикальное напряжение; σ_{zg} — напряжение от собственного веса грунта.

На рисунке 13 показаны величины глубины сжатия, вычисленные по СНиП 2.02.01-83* [9] и полученные экспериментально. При сравнении за активную глубину сжатия песка в опытах принималась такая глубина, на которой вертикальные перемещения

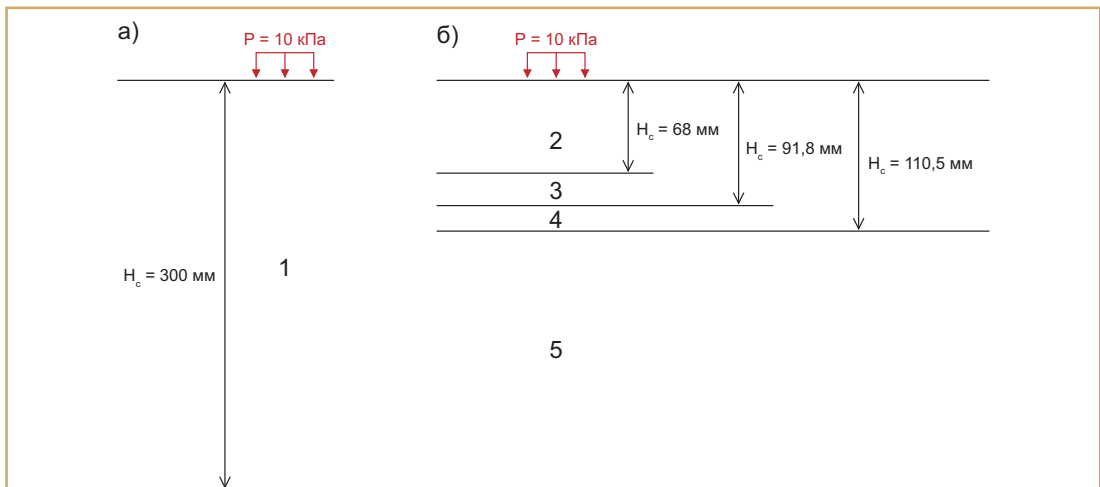


Рис. 13. Глубина сжимаемой толщи: а — вычисленная по СНиП 2.02.01-83 [9]; б — полученная опытным путем при различном вертикальном перемещении на границе активной зоны сжатия (В.С.); *P* — давление под штампом; *H_c* — глубина активной зоны сжатия; 1 — глубина активной зоны сжатия по расчету; 2, 3, 4 — опытная глубина сжатия 10,0; 7,5 и 5,0% от осадки штампа 2 мм соответственно; 5 — зона сжатия с вертикальными перемещениями менее 5% от осадки штампа 2 мм

основания составили 10,0; 7,5 и 5,0% от осадки штампа (2,0 мм) при постоянном давлении под штампом 10 кПа. Это давление соответствует линейно-упругому поведению песка (см. рис. 7).

Из рисунка 13 видно, что экспериментально полученные значения глубины сжимаемой толщи значительно меньше глубины активного сжатия, определенной по СНиП 2.02.01-83* [9]. Для осадки опытные значения также меньше. Объяснение данному несоответствию приведено в работе В.А. Барвашова [1], который отмечает парадоксальность значений глубины сжимаемой толщи, получаемых по методикам нормативных документов [9, 10], которые серьезно отклоняются от опытных данных. При этом он указывает: «Хотя рекомендации п. 5.5.41 ([10]. — *Авт.*) и основаны на экспериментальных данных, но их детальная верификация средствами математического моделирования не проводилась». В работе [2] В.А. Барвашов отмечает большую значимость зон разрушения под краями фундамента для определения несущей способности основания и описывает наблюдаемые в экспериментах прорезку под краем штампа и образование трещин разрушения на поверхности грунта. Развитие прорезки грунта у краев штампа косвенным образом наблюда-

лось и в опытах, проведенных авторами настоящей статьи, проявившись в виде локализации деформаций сдвига у краев штампа (см. рис. 14, 16, 20).

К моменту окончания фазы линейной зависимости осадки от давления (см. рис. 14) предельные относительные деформации сдвига песка $\gamma_{пр}$, равные 0,04 (см. рис. 6), распространяются на глубину. При осадке штампа 13,7 мм на границе перехода из области линейно-деформируемого поведения к нелинейному (см. рис. 7) глубина развития $\gamma_{пр}$ возрастает и равна (см. рис. 16). На рисунке 20 при нагрузке, близкой к предельной по устойчивости основания, четко видна уходящая в глубину до $0,7b$ зона с деформацией сдвига 200%. Относительная деформация сдвига γ у краев штампа фактически имеет значения, превышающие предел прочности песка, равный 0,04.

Значения осадки штампа, измеренные датчиком перемещений, равны осадке грунта под ним только в небольшой области непосредственно под его подошвой, что объясняется уплотнением основания. Под штампом образуется уплотненное грунтовое ядро, а изоляции вертикальных перемещений под ним повторяют очертания этого ядра (см. рис. 10, 18). Далее при увеличении давления под подошвой штампа зоны уплот-

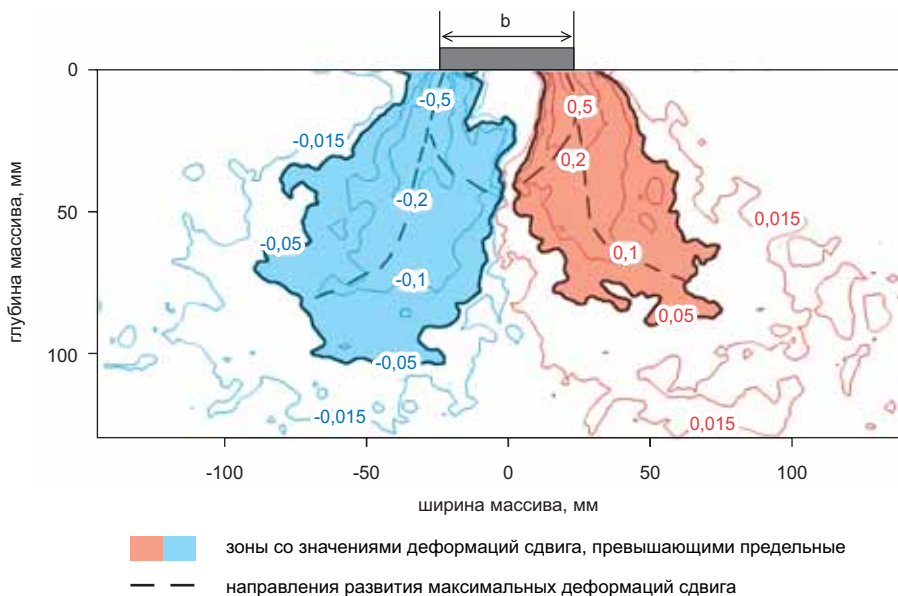


Рис. 14. Изолинии относительных деформаций сдвига при осадке штампа 10,1 мм: 1 — зоны со значениями деформаций сдвига, превышающими предельные; пунктирной линией показаны направления развития максимальных деформаций сдвига

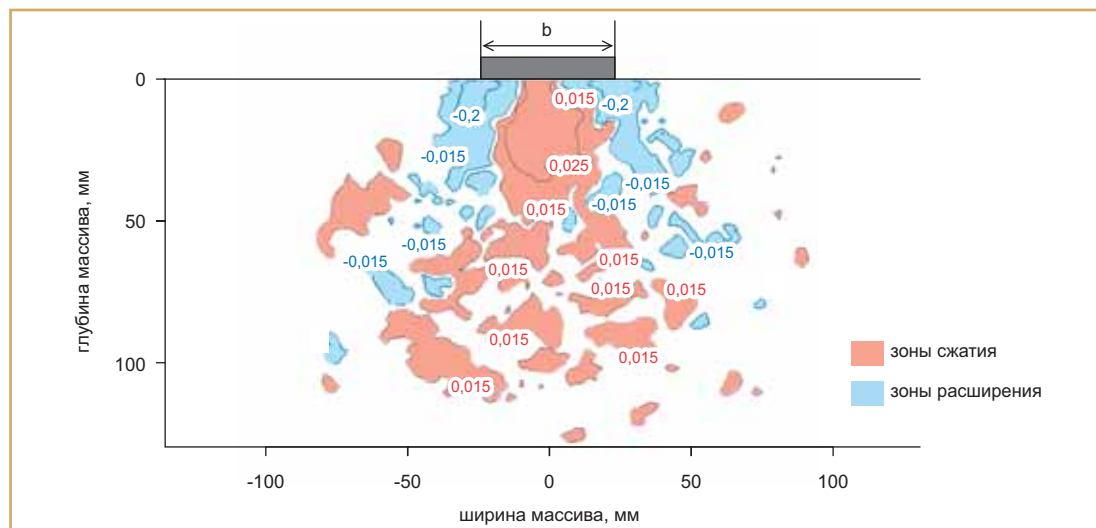


Рис. 15. Изолинии относительных деформаций объема при осадке штампа 10,1 мм: 1 — зоны сжатия, 2 — зоны расширения

нения распространяются вглубь и вширь. Величина уплотнения достигает максимального значения в грунтовом ядре под штампом. Зоны сдвига (см. рис. 14, 16, 20) зарождаются под краями штампа, а также локально под вершиной грунтового ядра при нагрузках, превы-

шающих предел пропорциональности зависимости «нагрузка–осадка» для штампа (см. рис. 16, 20).

Характер распределения вертикальных и горизонтальных перемещений при осадке штампа 13,7 мм (точка 2 на рис. 7) аналогичен таковому на предыду-

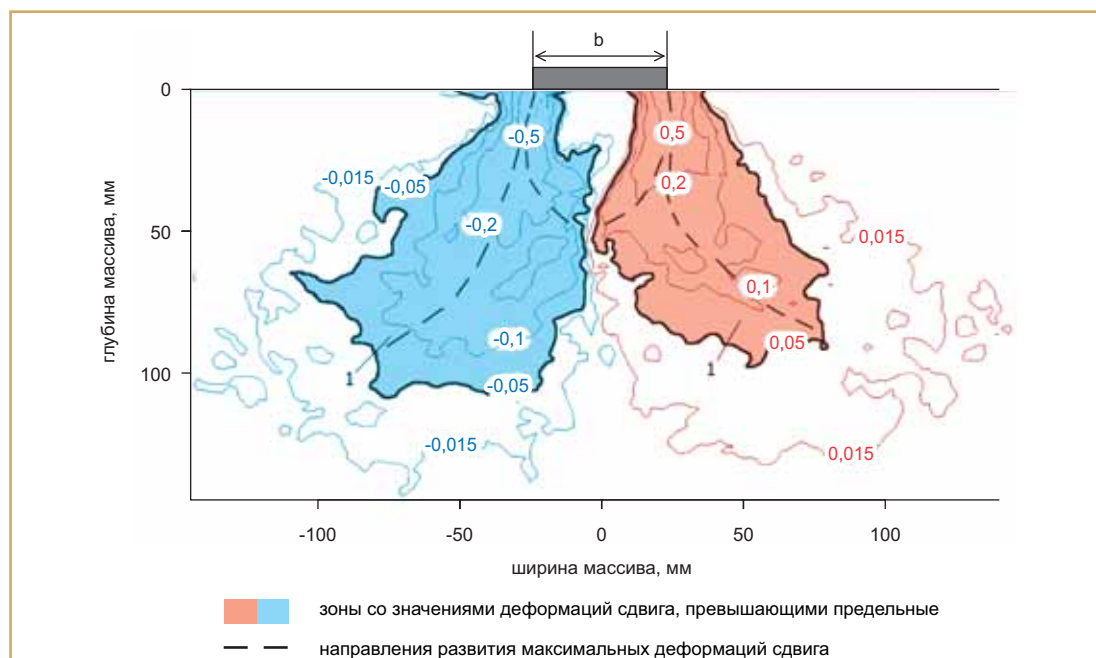


Рис. 16. Изолинии относительных деформаций сдвига при осадке штампа 13,7 мм: 1 — зоны со значениями деформаций сдвига больше предельных; пунктирной линией показаны направления развития максимальных деформаций сдвига

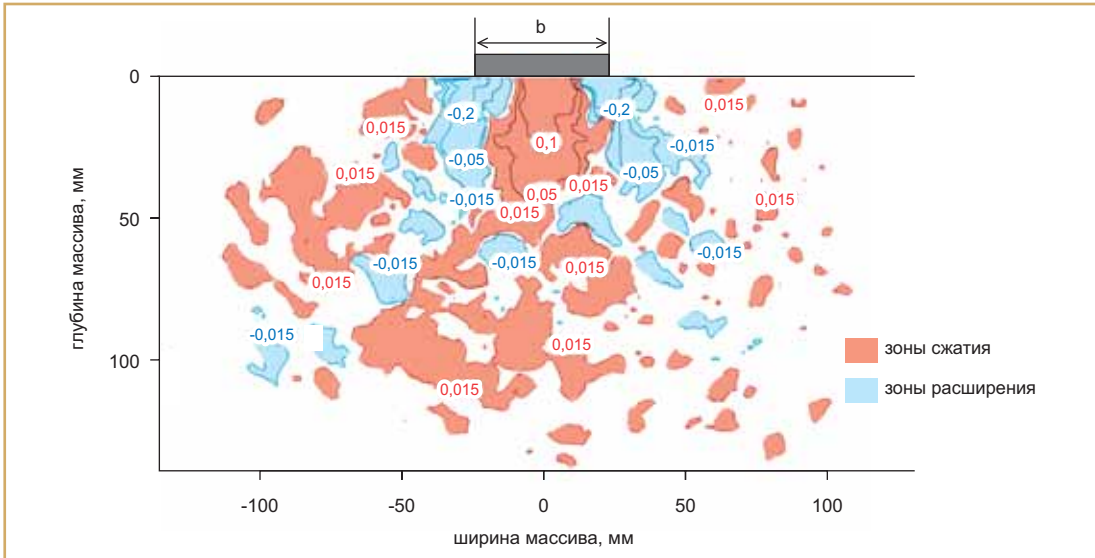


Рис. 17. Изолинии относительных деформаций объема при осадке штампа 13,7 мм: 1 — зоны сжатия, 2 — зоны расширения

шей ступени нагружения и отличается лишь количественно, поэтому здесь не приведен.

Наибольшие деформации сдвига наблюдаются у краев штампа, причем они развиваются не только вглубь песка, но и в сторону середины штампа (см. рис. 14, 16, 20), что уменьшает объем упругого грунтового ядра, постепенно превращая его в клин. Известно [11], что механизм потери устойчивости основания связан с образованием зон сдвига под краями штампа, их дальнейшим распространением в глубину и в стороны от его краев. Развитие этого про-

цесса можно наблюдать на рисунках 14, 16, 20. Относительные деформации сдвига γ достигают предельных значений ($\gamma_{пр} = 0,04$) первоначально под краями штампа, а затем развиваются вглубь основания. На рисунке 14 видно, что под краем штампа измеренная величина γ равна 0,5, что превышает предельную деформацию для песка почти в 12 раз. На глубине 100 мм (2) значение γ равно предельному (0,05). При осадке штампа 28,8 мм (см. рис. 20) величина γ под краем штампа равна 2,0, что уже в 50 раз превышает предельную деформацию сдвига для

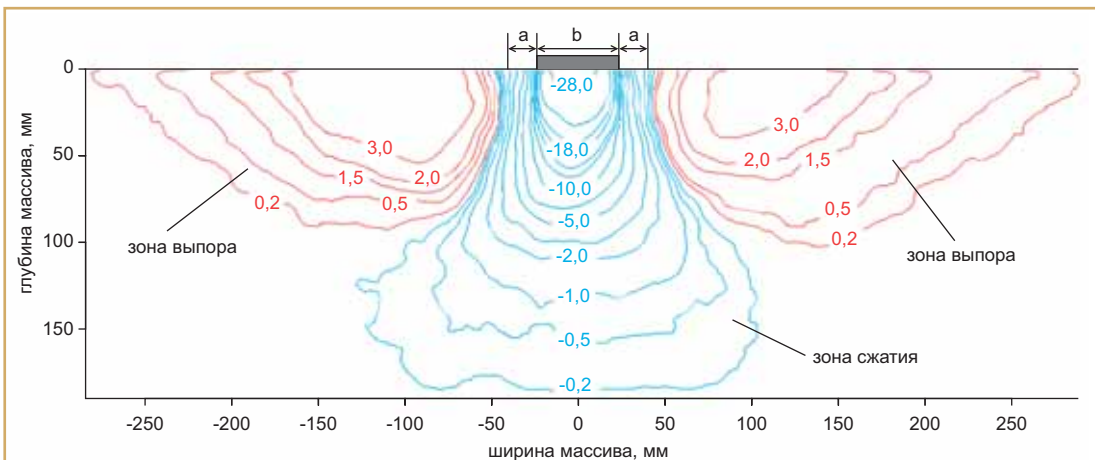


Рис. 18. Изолинии вертикальных перемещений, мм, при осадке штампа 28,8 мм: 1 — зона сжатия; 2 — зоны выпора; а — опускание свободной поверхности

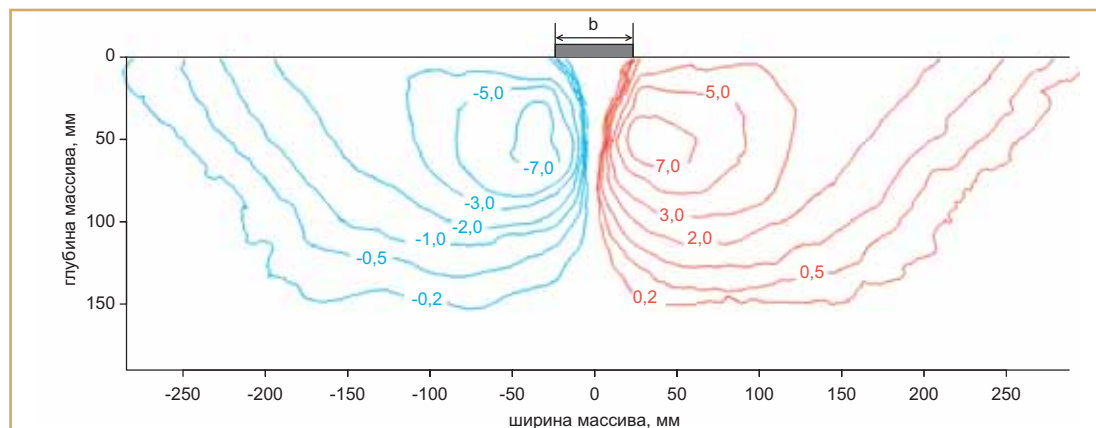


Рис. 19. Изолинии горизонтальных перемещений, мм, при осадке штампа 28,8 мм

данного вида песка. Следует заметить, что глубина развития зоны предельного и запредельного состояний практически не изменяется с ростом внешней нагрузки и равна 100 мм (см. рис. 14, 16, 20).

На рисунках 15, 17, 21 показано развитие зон уплотнения и расширения на различных ступенях нагружения. Общей тенденцией является уменьшение зоны уплотнения и возрастание зон расширения с ростом внешней нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. При использовании метода PIV были выявлены такие же качественная и количественная стороны ха-

рактера деформации основания, как и при использовании метода фотограмметрии.

2. Использование метода PIV в отличие от метода фотофиксации позволяет определить не только качественную, но и количественную сторону процесса деформации основания.

3. Под краями штампа в песчаном основании возникают деформации сдвига, превышающие предельные значения по прочности для песка в 10–50 раз (по мере роста внешней нагрузки).

4. Глубина развития зоны предельной деформации сдвига постоянна и не зависит от внешней нагрузки.

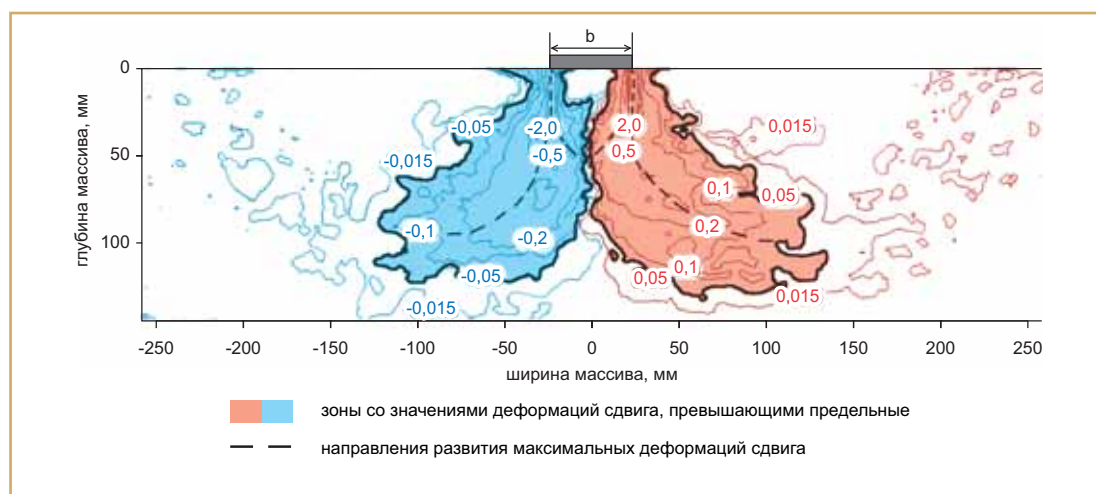


Рис. 20. Изолинии относительных деформаций сдвига при осадке штампа 28,8 мм: 1 — зоны со значениями деформаций сдвига, превышающими предельные; пунктирной линией показаны направления развития максимальных деформаций сдвига

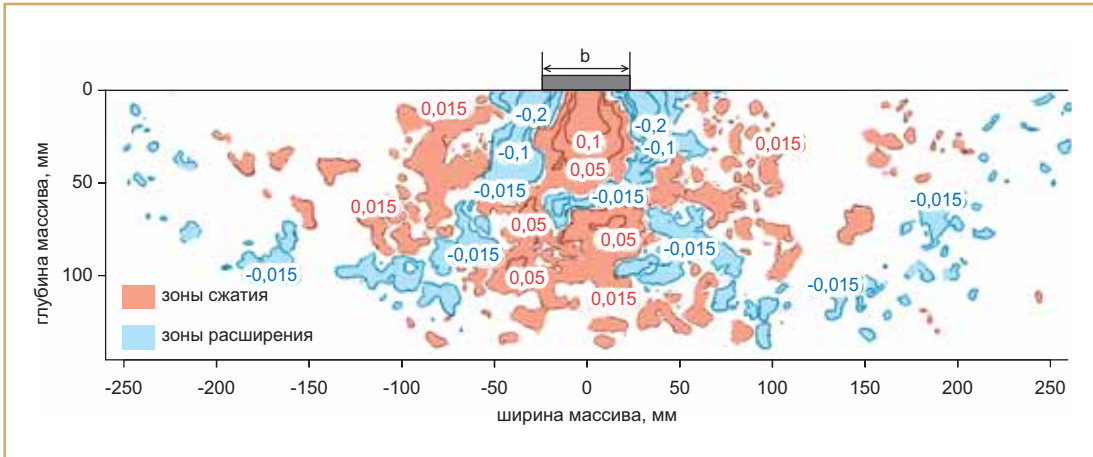


Рис. 21. Изолинии относительных деформаций объема при осадке штампа 28,8 мм: 1 — зоны сжатия; 2 — зоны расширения

Список литературы

1. Барвашов В.А. К вопросу расчета осадок по рекомендациям СП 50-101-2004 // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. № 1. С. 20–24.
2. Барвашов В.А. Расчетное сопротивление грунта основания и учет образования зон разрушения под краями фундамента // Геотехника. 2010. № 5. С. 48–56.
3. Болдырев Г.Г., Никитин Е.В. Деформация песка в основании плоского штампа // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1986. № 1. С. 26–28.
4. Гольдштейн М.Н., Царьков А.А., Черкасов И.И. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1981. 320 с.
5. ГОСТ 12248-96. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 96 с.
6. ГОСТ 12536-79. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. 18 с.
7. Курдюмов В.И. К вопросу о сопротивлении оснований. Фотографический способ исследования процесса разрушения песчаного слоя под влиянием местной нагрузки / Вторая публичная лекция 11 декабря 1889 г. Санкт-Петербург, 1891.
8. Малышев М.В. Теоретические и экспериментальные исследования несущей способности песчаного основания // Информационные материалы ВОДГЕО. М.: Изд-во ВОДГЕО, 1953. № 2. 83 с.
9. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. М.: Госстрой СССР, 1995.
10. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: Госстрой РФ, 2005.
11. Цытович Н.А. Механика грунтов: Краткий курс. 4-е изд. М., 1983. 88 с.
12. Adrian R.J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics // Annual Review of Fluid Mechanics. 1991. V. 23. P. 261–304.
13. Bostwick L., Rowe R.K., Take W.A., Brachman R.W.J. Anisotropy and directional shrinkage of geosynthetic clay liners // Geosynthetics International. 2010. № 3. P. 157–170.
14. Dutton M.G., Hault N.A., Take W.A. Towards a digital image correlation based strain sensor // The 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, September 2011. V. 4. P. 2195–2203.
15. Ni Q., Hird C.C., Guyrer I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry // Geotechnique. 2010. V. 60. № 2. P. 121–132.
16. PIVview User Manual // PIVTEC GmbH. 10.10.2011. URL: <http://www.pivtec.com>.
17. Roscoe K.H., Arthur J.R.F., James R.G. The determination of strain in soils by X-ray method // Civil Engineering and Public Works Review. 1963. V. 58. № 684–685. P. 873–876, 1009–1011.
18. Sevi A.F., Ge L., Take W.A. A large-scale triaxial apparatus for prototype railroad ballast testing // Geotechnical Testing Journal. 2009. V. 32. № 4. P. 297–304.
19. White D.J., Take W.A., Bolton M.D., Munachen S.E. A deformation measuring system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry and PIV image analysis // Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2001. V. 1. P. 539–542.
20. Zhao H., Ge L. Camera calibration using neural network for image-based soil deformation measurement systems // Geotechnical Testing Journal. 2008. V. 31. № 2. P. 192–197.