

© **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ В НАГРУЖАЕМОМ ОСНОВАНИИ.**
© **METHOD FOR DETERMINING THE PRESSURE IN THE PRESSES BASE.**

А. Коган, магистр.
A. Kogan, M. Sc.

© все права сохранены.
© all rights reserved.

Аннотация.

Способ относится к экспериментальным методам исследований и основан на идентификации давлений в образцах грунта (отбираются из шурфа на месте испытаний штампа), и в основании опытного штампа. Идентификация давлений достигается замерами изменений Δd диаметров шпуров "d" в образцах при их испытаниях, с построением графика $\Delta d/d = f(n_i)$, и такими же измерениями в натуре (шпуры бурятся в основании штампа горизонтально из шурфа отбора образцов до нагружения и после каждой ступени нагрузки " N_i "). Замеры диаметров "d" в приборе производятся непосредственно в процессе испытаний, а в натуре - по достижении предельной нагрузки, с разгрузкой, раскопкой основания, обнажением и замерами шпуров. Выведены зависимости между диаметрами шпуров в приборе и натуре, обеспечивающие подобие протекания процессов, приведена оценка влияния точности измерений на получаемые результаты. Описан опыт применения способа для определения давлений в основании, сложенном просадочными грунтами. Разработано и изготовлено устройство для бурения шпуров. Результаты указанных определений дали возможность снизить стоимость подготовки основания при строительстве цеха ремонта авиатехники на 45%.

Annotation.

The way concerns to experimental methods of researches and is based on identification of pressure in samples of a ground (are selected from excavation on a place of tests of a stamp), and in the basis of a skilled stamp. Identification of pressure is achieved by gauge of changes Δd diameters of the holes "d" in samples at their tests, with drawing of the diagram $\Delta d/d = f(n_i)$, and the same measurements in a nature (the holes is drilling in the basis of a stamp it is horizontal from excavation sampling up to loading and after each step of loading " N_i "). Gauge of diameters "d" in the device are made directly during tests, and in a nature - after achievement of a maximum load, with unloading, excavation of the basis, an exposure and gauge of holes. Dependences between diameters of holes at the device and the nature, courses of processes providing similarity are removed, the estimation of influence of accuracy of measurements on received results is given. Experience of application of a way for definition of pressure in the basis combined by weakness under watering grounds is described. The device for drill of holes also is made. Results of the specified definitions have enabled to lower cost of preparation of the basis at construction of shop of repair aircraft technicians on 45 %.

1. Введение.

Непосредственное измерение давлений в нагружаемом сжимаемом (нескальном) основании всегда представляло актуальную и трудную задачу для исследователей. С одной стороны, нуждалось в проверке теоретическое решение о распределении давлений по глубине сжимаемой толщи основания под нагруженным штампом. С другой стороны, нужны были ответы на практические вопросы строительства, когда теоретические решения отсутствовали - сложные грунтовые условия, новые виды фундаментов и т.п. Эта потребность привела к разработке ряда датчиков давления, работа которых основывалась на различных физических принципах, однако после ряда лет их употребления возобладало мнение о недостоверности получаемых результатов (Г. Лазебник и др., 1979). Главный недостаток всех датчиков заключался в неустраняемых искажениях, вно-

симых ими в природную грунтовую среду, и последующем влиянии на поведение грунта при испытаниях. Поэтому, область применения таких датчиков была ограничена лабораторными исследованиями, а их влияние на результаты испытаний не учитывалось.

В 60-х г.г. прошлого века В. Голубков серией широкомасштабных полевых исследований показал, что глубина сжимаемой толщи в грунтах (глинистых, песчаных) значительно меньше, чем предсказанная теорией (в среднем, более чем в 2 раза), а деформированный объем грунта под квадратным штампом имеет вид сфероида, с модификацией формы в зависимости от плотности грунта в сухом состоянии (ρ_d , кН/см³): от сплющенного шара в плотном грунте ($\rho_d \geq 15.0$) до эллипсоидного тела, вытянутого книзу, в слабом грунте ($\rho_d \leq 13.0$). Для фиксации глубины сжимаемой толщи и перемещений отдельных ее слоев в глинистых грунтах была разработана методика, одним из положений которой была подготовка основания. Эта подготовка заключалась в бурении горизонтальных шпуров (из шурфа отбора образцов грунта вблизи штампа), в которые заводятся цилиндрики - фиксаторы деформаций. По окончании испытаний, при достижении предельной осадки штамп разгружается и проводятся последовательные обнажения фиксаторов деформаций в вертикальных плоскостях с замерах послойных перемещений грунта.

Используя эту методику, А. Грицюк (1967) осуществил непосредственное измерение давлений, вызвавших послойные перемещения грунта на нескольких горизонтах в пределах сжимаемой толщи. Для этого вначале проводилось штамповое испытание на подготовленном основании (лессовый грунт 1 типа просадочности, мощностью 4.7м.), с последующим обнажением фиксаторов и замерах послойных перемещений грунта. Затем, на уровнях горизонтов фиксаторов первого испытания проводились новые испытания, с доведением осадок до величин, равных полученным в первом испытании на каждом уровне - величины нагрузок, соответствующие этим осадкам, приравнивались давлениям, вызвавшим указанные осадки. Данный способ позволил впервые установить фактические величины давлений, действующих на различных глубинах в нагруженном сжимаемом основании. Вместе с тем, ему был присущ и ряд существенных недостатков: давления можно определить только на вертикальной оси по центру штампа; деформации основания при первом и последующих испытаниях протекают различно (неучитываемые погрешности в определении давлений); большая трудоемкость и длительность испытаний (испытано 6 штампов) - все это явилось препятствием для дальнейшего применения данного способа.

При проведении исследований булавовидных свай с пирамидальным уширением ствола в лессовидных суглинках автор применил шпур без закладки фиксаторов. По окончании испытаний, при раскопках и обнажениях шпуров было установлено, что, несмотря на интенсивное и длительное замачивание основания, шпур в отдалении от свай сохранили форму цилиндрических отверстий с гладкими стенками; по мере приближения к поверхности сваи они претерпевали постепенный изгиб книзу, а их вертикальные размеры плавно уменьшались, вплоть до нуля (полное сплющивание) непосредственно под подошвами свай. Очевидно, что эти изменения отвечали действовавшим давлениям. Этот экспериментальный факт послужил основой для разработки способа определения давлений, вызывающих деформации связного грунта в любой точке основания, с проведением одного штампового и одного (нескольких) лабораторных испытаний.

2. Способ определения давлений в нагружаемом основании.

А. Описание способа.

Осуществление способа ведется путем выполнения следующих этапов - рис.1:

1. отрывка шурфа 1 на площадке штампового испытания с отбором образцов грунта 2 для лабораторных испытаний.
2. штамповое испытание ("натура", этап 2а) - бурение горизонтальных шпуров 3 из шурфа 1 отбора образцов в вертикальной плоскости 5 по оси симметрии штампа до приложения первой сту-

пени нагрузки $N_{1,нат}$ и в нескольких смежных плоскостях b перед приложением каждой очередной ступени нагрузки $N_{2,нат}, N_{3,нат}, \dots$; разгрузка штампа, последовательное обнажение шпуров (этап 2б) с замерами границ деформированного грунта и вертикальных размеров $d_{нат,i}$ в контрольных точках выбранной координатной сетки; определение отношений $\Delta d_{нат,i} / d_{нат,i}$.

3. лабораторные испытания образцов - "моделей": устройство горизонтальных отверстий в образцах; ступенчатое приложение нагрузок $N_{1,мод}, N_{2,мод}, \dots$ (этап 3а) на штамп площадью A с замерами изменений диаметров отверстий " $\Delta d_{мод}$ " для каждой ступени нагрузки; построение графиков (этап 3б) $\Delta d_{мод} / d_{мод} = f(n_{мод})$; $n_{мод} = N / A$. Испытания ведутся по схеме компрессионного сжатия (с исключением трения образца о стенки обечайки 7) - так как в природе шпур бурятся в плоскостях, близких к оси штампа и деформации грунта протекают аналогично.

4. нахождение давлений $p_{нат}$ во всех контрольных точках основания путем использования отношений $\Delta d_{нат,i} / d_{нат,i} = \Delta d_{мод} / d_{мод}$ в графиках $\Delta d_{мод} / d_{мод} = f(n_{мод})$ из п.3.

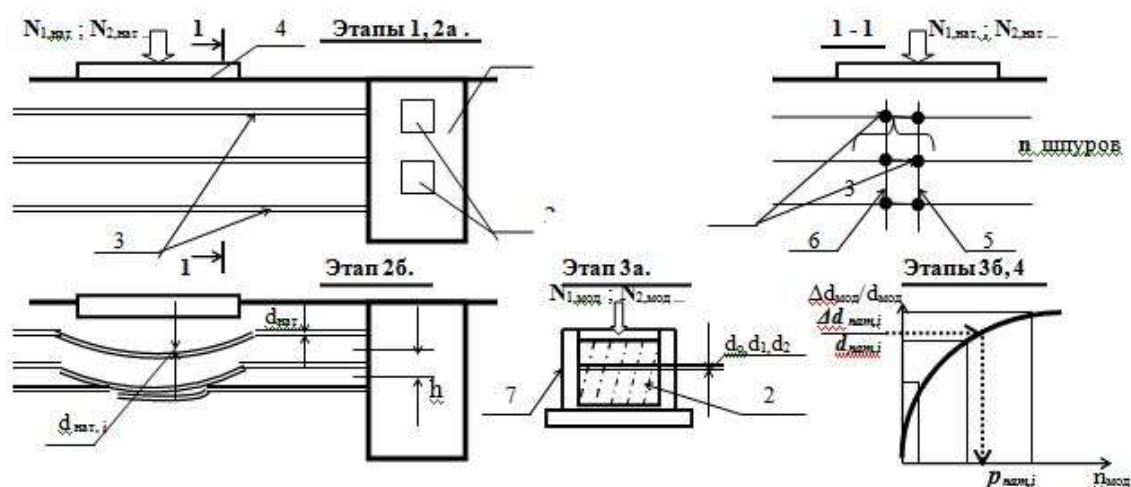


Рис. 1. Схема испытаний в приборе и натуре.

Б. Вывод расчетных зависимостей.

Как показали В. Голубков, Л. Кудрякова (1967), Р. Кодрянова (1969) соответствие процессов деформирования грунта в приборе (модели) и натуре соблюдается при проведении испытаний образцов (отобранных вблизи штампа) с возможностью объемного расширения грунта и при равенстве объемных относительных деформаций в модели и натуре: $\epsilon_{об.м.} = \epsilon_{об.н.} = V_s / V_a$ (1) (соответствуют безразмерным комплексам, используемым в теории подобия и моделирования).

Здесь обозначено: "м", "н" - соответственно модель, натура; $V_s = A \cdot s$ - объемная осадка - объем грунта, вытесненный штампом площадью A (в приборе или натуре), при его перемещении на величину осадки s ; V_a - объем зоны деформации (ЗД) - объем деформированного грунта под штампом (в приборе или натуре).

Рассмотрим часть объема ЗД с выделенным i -м горизонтальным слоем - рис. 2; здесь: h_i - вертикальное расстояние между шпурами (толщина слоя); s_i - осадка на вертикальной оси штампа в средней плоскости слоя; a_i - диаметр средней плоскости слоя; n - количество шпуров в средней плоскости слоя; d - диаметр шпура.

Очертание границы ЗД по принимаем по сфере. Анализ результатов раскопок оснований штампов после разгрузки показал, что линии осадок шпуров с хорошим приближением могут быть описаны параболами.

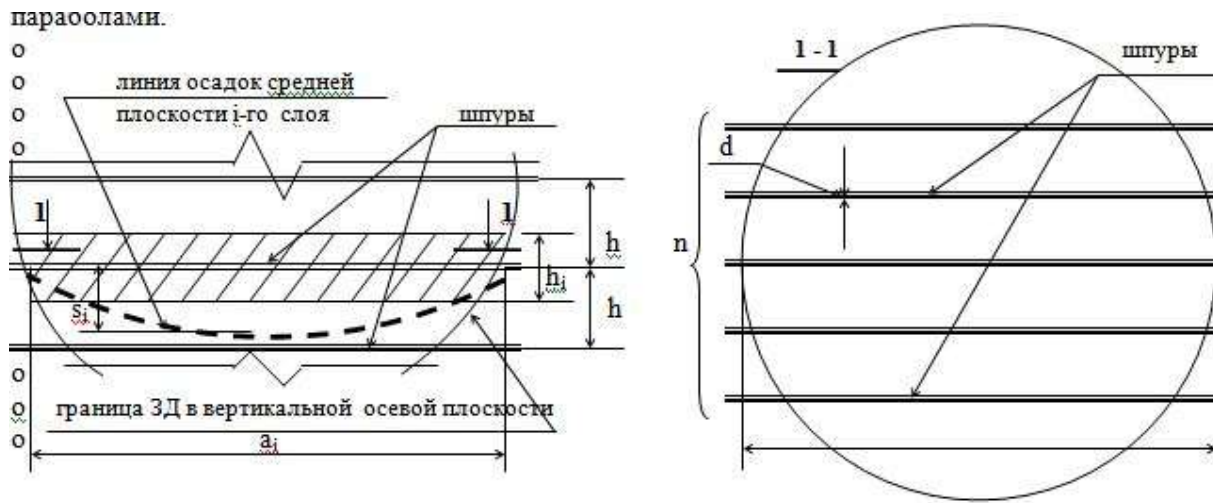


Рис. 2. Часть объема ЗД с выделенным слоем.

Теперь: объемная осадка, как объем параболаида - $V_{si} = 0.5\pi(a_i / 2)^2 s_i = 0.125\pi a_i^2 s_i$; объем ЗД слоя, как объем шарового слоя, заменяемого объемом цилиндра - $V_{ai} = \pi(a_i / 2)^2 h_i = 0.25\pi a_i^2 h_i$, и $\epsilon_{об.и} = V_{si} / V_{ai} = 0.5s_i / h_i = 0.5\epsilon_i$ (2)

где ϵ_i - линейная относительная деформация на вертикальной оси.

Количество шпуров, пробуриваемых в слое, диктуется условиями исследований и требуемой точностью определения осадки слоя. Условие точности: $s_i : s_{шп,и} = m$, где s_i - осадка слоя без шпуров и $s_{шп,и}$ - осадка слоя со шпурами. Определим величины этих осадок. По В. Голубкову (1969) осадка фундамента, определяемая из условия равенства работ внешних и внутренних сил:

$$s = R_{гр.сп.} V_a / p_{э} A \quad (3)$$

где $R_{гр.сп.}$ - реактивное сопротивление грунта уплотнению в пределах V_a ; $p_{э} = p - p_{сy}$ - эффективное давление в грунте, вызывающее деформацию и равное полному давлению за вычетом структурного сопротивления уплотнению. Переходя к отдельному слою: $s_i = R_{гр} V_{a,i} / p_{э,i} A_i$, откуда для слоя без шпуров $s_i = (R_{гр} / p_{э,i}) \cdot (0.25\pi a_i^2 h_i / 0.25\pi a_i^2) = R_{гр} h_i / p_{э,i}$. Далее определим среднюю площадь слоя с учетом шпуров - $A_{шп,и}$. Средняя длина шпура $l_{ср} = A_{слоя} / a_i = 0.25\pi a_i^2 / a_i = 0.25\pi a_i$. Объем шпуров: $V_{шп,и} = l_{ср} f_{шп} n = 0.25\pi a_i \cdot 0.25\pi d^2 \cdot n = 0.617 a_i d^2 n$. Среднюю площадь слоя с учетом шпуров найдем, как средневзвешенную: $A_{шп,и} = (V_{a,i} - V_{шп,и}) / h_i$. Теперь, осадка слоя со шпурами: $s_{шп,и} = R_{гр} V_{a,i} / (p_{э,i} (V_{a,i} - V_{шп,и}) / h_i) = R_{гр} V_{a,i} h_i / (p_{э,i} (V_{a,i} - V_{шп,и}))$. Возвращаясь к условию точности, находим: $s_i : s_{шп,и} = m = h_i / (V_{a,i} h_i / (V_{a,i} - V_{шп,и})) = 1 - (V_{шп,и} / V_{a,i}) = 1 - (0.617 a_i d^2 n / 0.785 a_i^2 h_i) = 1 - 0.786(d^2 n / a_i h_i)$. Отсюда, допустимое количество шпуров в слое, обеспечивающее условие точности:

$$n = a_i h_i (1-m) / 0.786 d^2 = 1.27 a_i h_i (1-m) / d^2 \quad (4)$$

Используя для иллюстрации употребительные величины $h_i = 40$ см., $d = 2$ см., и шаг шпуров 20.0 см., найдем величину точности, которая обеспечивается в слое диаметром $a_i = 1.0$ м. ($n = 5$): $m = 1 - 0.786(2^2 \cdot 5 / 100 \cdot 40) = 1 - 0.004 = 0.996$ - достаточно высокий показатель, объясняемый малой величиной объема шпуров в сравнении с объемом слоя - 0.004 , или 0.4% .

Определим соотношение между диаметрами шпуров в модели и натуре при испытаниях, обеспечивающее подобие протекания процессов деформирования грунта.

$V_{s,шп,и} = A_{шп,и} \cdot s_{шп,и} = s_{шп,и} (V_{a,i} - V_{шп,и}) / h_i$; $\epsilon_{об,шп,и} = V_{s,шп,и} / V_{a,i} = (s_{шп,и} / h_i) \cdot (1 - V_{шп,и} / V_{a,i}) = (s_{шп,и} / h_i) \cdot (1 - m)$. Согласно (1): $\epsilon_{об.м.} = \epsilon_{об.н.}$ и $\epsilon_{об,шп,и,м} = \epsilon_{об,шп,и,н.}$ Теперь, (опуская общие индексы): $(s_m / h_m) \cdot (1 - m) = (s_n / h_n) \cdot (1 - m)$; $\epsilon_m \cdot 0.786(d_{м,н}^2 n_m / a_m h_m) = \epsilon_n \cdot 0.786(d_{н,н}^2 n_n / a_n h_n)$, откуда: $d_{м,н}^2 n_m / a_m h_m = d_{н,н}^2 n_n / a_n h_n$ и

$$d_m = d_n \sqrt{(n_n / n_m) \cdot (a_m h_m / a_n h_n)} \quad (5)$$

Поскольку в лабораторных испытаниях обычно моделируется сжатие грунта вокруг одного шпура:

$$d_m = d_n \sqrt{n_n a_m h_m / a_n h_n} \quad (6)$$

В. Оценка погрешностей измерений.

Предложенный способ базируется на измерениях размеров, проводимых различными средствами - линейкой и индикаторами часового типа в модели, рулеткой и штангелем в натуре. Учитывая разную точность, получаемую при использовании этих средств, важное значение приобретает оценка погрешностей измерений и их влияние на точность получаемых результатов. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Обозначим относительные погрешности измерений - отношение измерений с погрешностью к истинным значениям: α - для d , β - для a , γ - для h . Используя (6) и помечая знаком "'" величины с погрешностью, получим: $d_m' = d_n' \sqrt{n_n a_m' h_m' / a_n' h_n'}$. Переходя к относительным погрешностям: $d_m' = \alpha_n d_n \sqrt{n_n \beta_m a_m \gamma_m h_m / \beta_n a_n \gamma_n h_n} = \alpha_n d_n \sqrt{\beta_m \gamma_m / \beta_n \gamma_n}$, и:

$$\alpha_n = \alpha_m / \sqrt{\beta_m \gamma_m / \beta_n \gamma_n} \quad (7)$$

Измеряемые величины и максимальные значения погрешностей их измерений составляют:

для модели $d_m = (5.0...10.0) \pm 0.05$ мм.; $a_m = h_m = 150.0 \pm 1.0$ мм.

для природы $d_n = (15.0...25.0) \pm 0.5$ мм.; $a_n = (50.0...250.0)$ см. ± 1.0 см. $h_n = (30.0...40.0)$ см. ± 0.1 см.

Теперь, для модели (вычисления опущены): $\alpha_m - 0.5...1\%$; $\beta_m, \gamma_m - 0.7\%$; для природы: $\beta_n - 0.4...2\%$; $\gamma_n - 5...7\%$ и $\alpha_n - 1...3\%$, а по (7), с учетом совокупного влияния всех погрешностей, $\alpha_n = 1...5\%$. Таким образом, при использовании способа обеспечивается принятая в технических измерениях погрешность в пределах 5%.

3. Опыт применения способа.

А. Общие данные.

Способ применен при строительстве цеха ремонта авиатехники. Конструктивное решение цеха - металлический каркас, навесные панели с эффективным утеплителем и кровля из панелей типа "сэндвич". В литологическом разрезе основания представлены (ниже почвенно-растительного слоя, мощностью 0.7 м.) четвертичные отложения - суглинки лессовидные, желтовато-серо-бурые и палево-желтые, от твердых в верхней части до текучих на глубине ниже 5.0 м. Особенностью геологического строения являлся II тип просадочности подстилающих слоев (просадка от собственного веса грунта при замачивании основания). В соответствии с требованиями норм требовалось либо прорезать слабые слои сваями, либо вскрыть слабый слой в местах размещения фундаментов и заменить его уплотненным грунтом. Оба варианта в данном случае приводили к резкому удорожанию строительства - сваи нужны были большой длины (плотный грунт находился на значительной глубине), замена же грунта с уплотнением была продолжительной операцией, превышающей время монтажа каркаса цеха, а по стоимости сопоставимой со стоимостью фундаментов. В этих условиях было принято предложение автора по экспериментальному определению фактического давления на кровлю слабого слоя и выяснению вопроса о возможности проявления II типа просадочности при замачивании грунта. С этой целью был проведен комплекс лабораторных и полевых исследований с использованием описанного выше способа.

Б. Геологические условия площадки строительства.

Характеристики грунтов (ниже почвенно-растительного слоя) по данным изысканий института "Укразропроект" представлены в табл. 1.

Таблица 1.

№ слоя	Описание грунта	Х а р а к т е р и с т и к и								
		мощность.	ρ , кН ¹⁾ /см ³	ρ_d , кН/см ³	e	$E/E_{внс}$ ²⁾ Мпа	$W_{сст}$	I_p	φ°	c , Мпа
1	Суглинок лессовидный, желто-бурый, малой плотности, твердый, I тип ³⁾	2.0	17.7	15.0	0.80	6.6/4.3	0.18	0.15	24	0.02
2	Суглинок лессовидный, серо-бурый, малой плотности, твердый, I тип ³⁾	0.5	15.6	13.5	0.98	8.3/1.9	0.16	0.12	20	0.006
3	Суглинок лессовидный, палево-желт., малой плотн., тверд. и полутв., II тип ³⁾	1.5	15.9	13.8	0.96	6.4/1.8	0.14	0.08	23	0.004
4	Суглинок лессовидный, палево-желт., малой плотн., тугопластичн. и текучий	пройдено 2.0	–	–	–	–	0.31	0.09	–	–

1) килоньютон 2) водонасыщенный 3) указан тип просадочности

В. Натурные испытания.

В качестве штампа использована ж.б. плита, размерами в плане 3.0 x 1.5 м., уложенная в приямке по песчаному выравнивающему слою на кровлю слоя 1. Для наблюдений за осадками плиты устраивалась реперная система, состоящая из горизонтальных уголков, закрепленных на плите, и вертикальных штырей, забитых в грунт на расстоянии 1.5 м. от краев плиты. Величины осадок определялись замерами вертикальных расстояний от уголков до торцов штырей при помощи штангельглубиномера с ценой деления 0.05 мм. Положение торцов штырей контролировалось привязкой к отдаленному неподвижному реперу. Поблизости от штампа был открыт шурф, глубиной 4.0 м., для бурения шпуров; в процессе отрывки из него был отобран один образец грунта для лабораторных испытаний (исходя из ожидаемой малой глубины ЗД). Схема испытаний и расположение шпуров показаны на рис. 3.

Для образования шпуров в основании штампа была разработана и изготовлена установка сверления шпуров. Установка включала в себя раму из трубчатых элементов, закрепленную на ж.б. подставке, и рабочую площадку с размещенным на ней электромотором. Площадка перемещалась по вертикали и фиксировалась в строго горизонтальном положении на уровнях бурения. Электромотор при включении вращал патрон с закрепленным в нем буром и через редуктор муфту, перемещавшую его по неподвижному винту в направлении бурения. Необходимая длина шпуров достигалась присоединением съемных секций бура, диаметр его сверла был равен 23 мм.

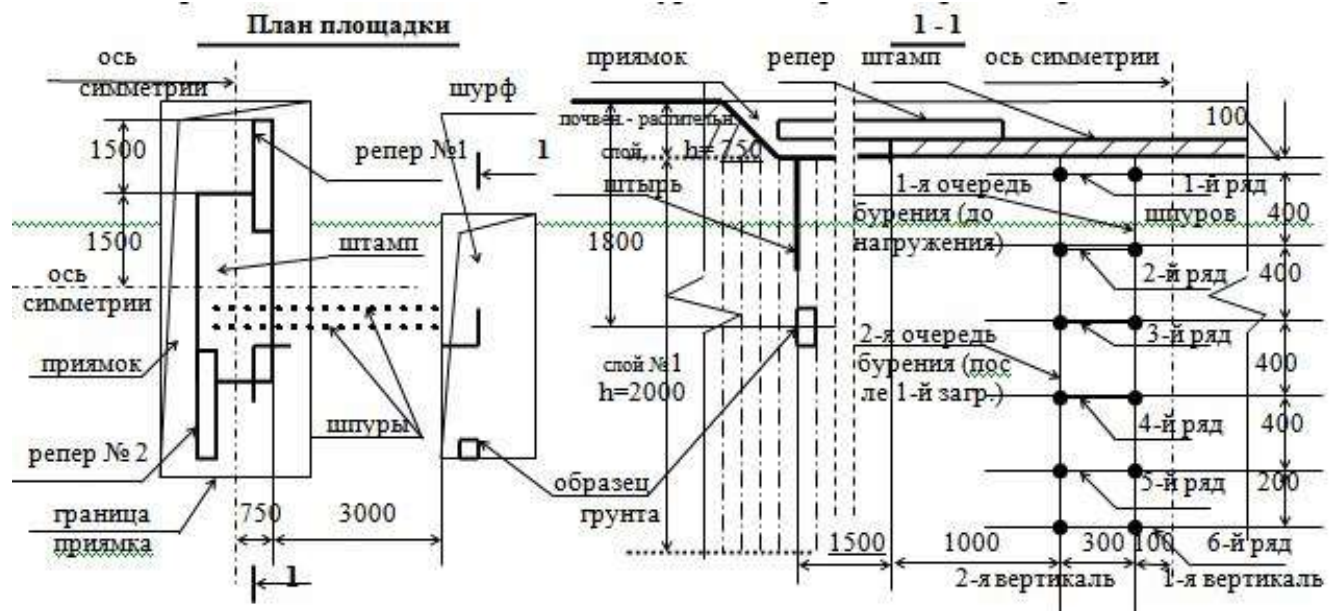


Рис. 3. Схема испытания штампа.

Количество шпуров по вертикали назначалось с учетом ожидаемой глубины ЗД ≈ 2.0 м. (оценивалась по результатам испытаний в подобных грунтах). Количество шпуров в каждом слое, определяемое по (4), при $h = 40$ см., $1-m = 0.004$, $d = 2.3$ см.: $n = 0.038 \cdot a$. Принимая далее $a_{\max} = 1.9$ м. (также по опыту исследований), получаем $n = 7.2$ или 7 шпуров. С учетом производственных требований, в каждом слое были пробурены только первые 2 шпура.

Нагружение, начиная с $p = 0.06$ МПа, велось ступенями по 0.03 МПа на грунте естественной влажности до 0.12 МПа.- исходя из намечаемого размещения ЗД в верхнем слое. Затем проводилось непрерывное замачивание основания до стабилизации осадки. Величины условной стабилизации принимались: на промежуточных ступенях 0.05 мм/сутки, на последней 0.05 мм. за 2 суток, на замоченном грунте 0.05 мм. за 3 суток. Графики осадок представлены на рис. 4.

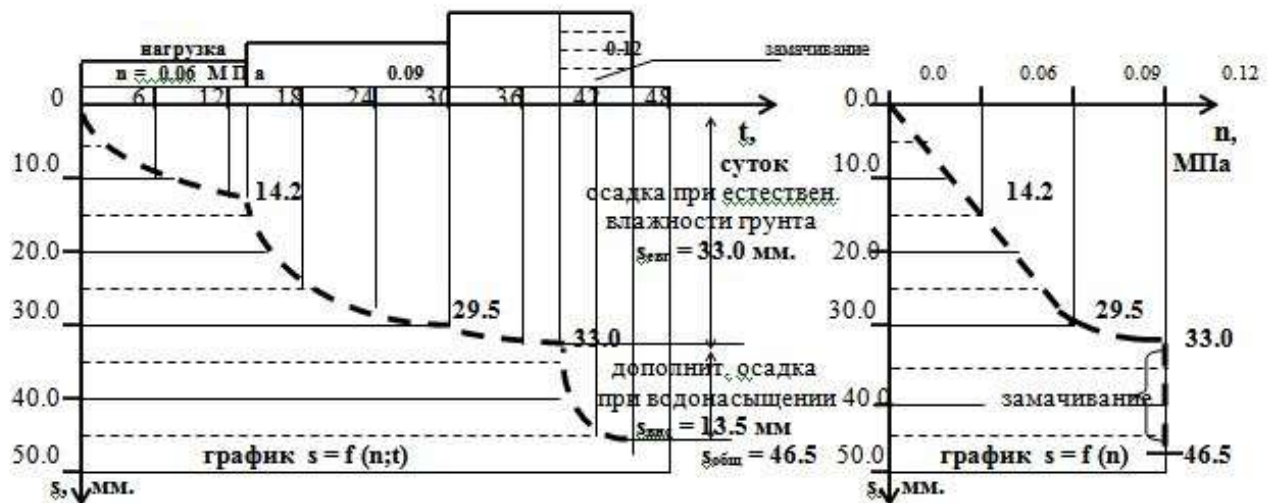


Рис. 4. Графики осадок.

Вслед за разгрузкой штампа его основание было раскопано, затем зачищались вертикальные плоскости перед шпурами и с помощью отвеса наносилась сетка вертикальных линий с шагом 250 мм.; после этого проводилось обнажение шпуров скальпелем. Замеры их вертикальных

размеров в точках пересечений с отвесными линиями выполнялись при помощи штангеля с ценой деления 0.05 мм. и двухкратного увеличительного стекла - что обеспечивало точность измерений ± 0.025 мм. В качестве результата измерения в каждой точке принималось среднее 2 замеров, округленное до 0.1мм. Картина деформаций шпуров, величины осадок и размеры шпуров показаны на рис. 5 (изображена 1-я вертикаль шпуров рядом с осью симметрии; на 2-й вертикали, пробуренной перед второй ступенью нагружения, величины осадок и деформаций шпуров, в основном, идентичны).

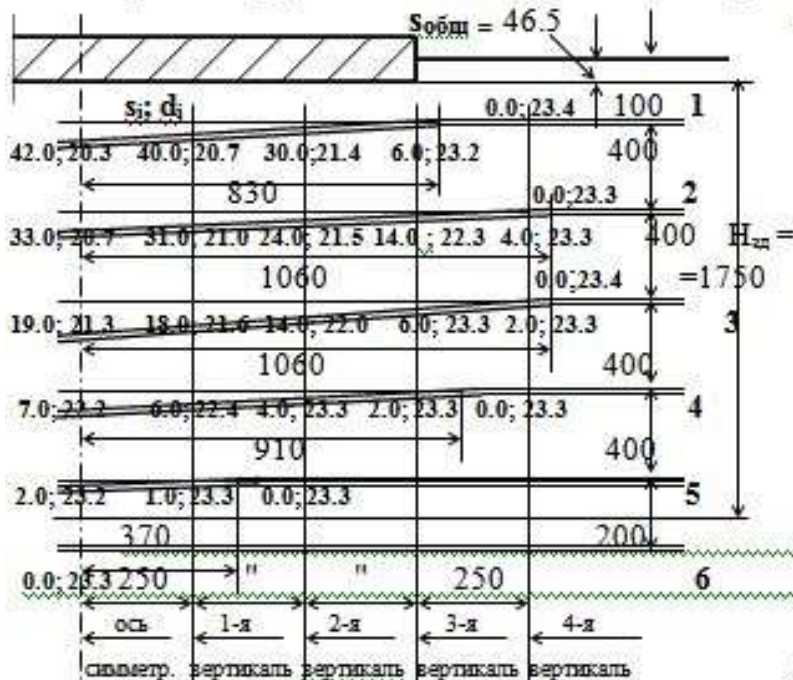


Рис. 5. Осадки и деформации шпуров.

Проведенные испытания штампа позволяют сделать следующие выводы:

1. При полной нагрузке 0.12 МПа на грунте естественной влажности осадка составила 33.0 мм., дополнительная осадка при замачивании основания - 13.5 мм., общая осадка равна 46.5 мм (< 50.0 мм., критерия II типа просадочности). Таким образом, несмотря на длительное и непрерывное замачивание основания (6 суток), просадочные явления не наблюдались.

2. Зона деформации под штампом имеет вид цилиндрического тела с полушариями в торцах и срезанными верхними секторами; наибольшие размеры поперечного сечения: ширина 2.12 м., высота 1.75 м. Расстояние от низа ЗД, где отсутствуют деформации грунта, до кровли слабого слоя (суглинка лессовидного II типа просадочности) составляет 0.75 м.

3. Отсутствие просадки грунта в данном случае объясняется рядом причин: наличием более плотных грунтов (2.5 м.) над слабым слоем; принятой величиной давления штампа на грунт, при которой нижняя граница ЗД разместилась в верхних слоях основания. В случае дальнейшего повышения нагрузки на штамп нижняя граница ЗД достигла или вошла бы в слабый слой, что сопровождается резким приростом осадок. В. Голубков отмечал (1973) и другие случаи, при которых лабораторные определения II типа просадочности не подтверждаются при натурных испытаниях - например, наличие глубокого склона (овраг, ручей, берег моря) поблизости от места застройки, когда вода проходит сквозь напластования грунта в сторону понижения, и условия для полного водонасыщения просадочной толщи не создаются.

4. На графике $s = f(p)$ - рис. 4 - уположение линии осадок после нагрузки $p = 0.09$ МПа может трактоваться, как завершение мобилизации прочностных характеристик грунта в пределах верхней части ЗД, а дальнейшее перемещение штампа - как достигаемое за счет деформаций нижерасположенных слоев грунта при менее интенсивном приросте осадок.

5. Рассмотрение величин s и d на рис. 5 позволяет установить, что:

- наибольшие осадки концентрируются на вертикальной оси штампа, резко убывая ниже линии максимального поперечного размера ЗД (шпур 3);
- осадки грунта вблизи подошвы штампа не достигают его общей осадки; наибольшие в центре, они постепенно уменьшаются на длине $2/3$ полуширины и резко падают к его границе;
- осадки до 6.0...7.0 мм. на границе ЗД и вблизи нее (3-я вертикаль) сопровождаются незначительными деформациями шпуров ($< 0.5\%$), в то время как при таких же осадках на оси симметрии и вблизи нее (1-я вертикаль) деформации шпуров достигают 5%;
- бóльшие по величине осадки в пределах размера полуширины штампа - 14.0 мм., шпур 2, 3; 18.0, 19.0 мм., шпур 3; 30.0, 31.0 мм., шпур 1, 2 - сопровождаются близкими (соответственно) значениями деформаций шпуров.

Г. Лабораторные испытания образца грунта.

Испытания проводились по схеме компрессионного сжатия в разрезном (по вертикали) кольце $\varnothing 150$ мм. и высотой 150 мм. Посередине высоты в нем были просверлено горизонтальное отверстие $\varnothing 10.0$ мм. Контрольная проверка характеристик грунта дала следующие результаты: $\gamma = 17.6$ мН/см³; $W = 0.16$.

После заправки образца в кольцо последнее разделялось на половины, боковая поверхность образца покрывалась машинной смазкой густой консистенции - для снижения трения о стенки - и полукольца вновь соединялись. После этого в образце сквозь имеющиеся отверстия кольца было проделано горизонтальное отверстие посередине высоты $\varnothing 9.5$ мм. (диаметры отверстий в модели, определенные по (6) с учетом принятых значений d_n , n_n , h_n , a_m , h_m и замеренных величин a_n , для шпуров в уровнях 1...5 составили 5.4...10.5 мм.; принятый размер превышал среднюю величину с целью избежать возможного сплющивания отверстия при замачивании). Кроме того, снизу по оси образца проделывалось вертикальное отверстие $\varnothing 4.5$ мм. - рис. 6 - до пересечения с горизонтальным. В это отверстие была введена медная трубка $\varnothing 4.0$ мм., длиной 65.0 мм., в которую заводился стальной штырь $\varnothing 3.0$ мм. покрытый смазкой. Штырь завинчивался верхним концом в горизонтальную медную трубку $\varnothing 4.0$ мм., прижатую к грунту в верхней части горизонтального отверстия, а его низ опирался на подвижный стержень индикатора часового типа ИЧ-50 (цена деления 0.01 мм.). Выступающая вниз часть штыря пропусклась сквозь обойму с микрометрическим винтом, позволяющим перемещать вниз штырь с присоединенной трубкой. Поверх образца укладывался стальной штамп, на который через рычажную систему передавался вес грузов. Перемещения штампа измерялись индикатором ИЧ-25 (цена деления 0.01 мм.). Положение нижней части горизонтального отверстия контролировалось в начале и конце испытания следующим образом: после снятия начальных контрольных отсчетов (без дополнительного нагружения), штырь с трубкой при помощи микрометрического винта опускались до нижней поверхности горизонтального отверстия, снимались показания индикатора и они возвращались в исходное положение; по окончании испытаний эта процедура повторялась.

После обжатия бытовым давлением (0.016 МПа) при естественной влажности, прикладывалась нагрузка ступенями по 0.01 МПа до 0.03 МПа, потом по 0.03 МПа до 0.15 МПа. Затем образец был разгружен, замерена упругая часть осадки и вслед за этим вновь загружен ступенями до 0.15 МПа с выдержкой каждой ступени до достижения полученной при первом нагружении осадки. Вслед за этим образец замачивался и после стабилизации осадки нагружение было продол-

жено до 0.20 МПа. Каждая ступень нагрузки выдерживалась до наступления условной стабилизации, принятой 0.01 мм. в сутки, а в замоченном грунте - 0.01 мм. за 2 суток.

Схема испытания и общий вид установки в процессе испытаний показаны на рис. 6, 7.

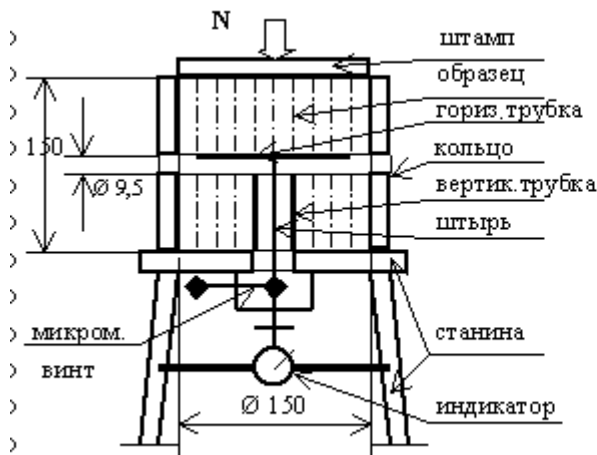


Рис. 6. Схема испытания образца.

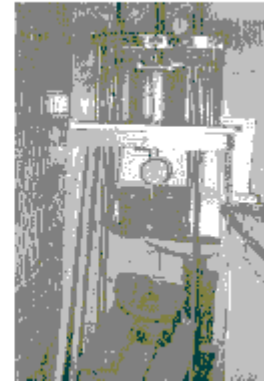


Рис. 7. Общий вид установки.

В результате проведенных испытаний получены данные по изменениям диаметров отверстия и осадкам образца в зависимости от вызвавших их давлений. Это представлено на графиках $(\Delta d_M/d_M) = f(p)$ и $s_M = f(p)$ - рис. 8. На нижнем графике $p_{cy} = 0.03$ МПа - структурное сопротивление грунта уплотнению, отвечающее величине давления, при котором зафиксирован перелом на графике "давление-осадка" (не приводится; определялось приложением давлений по 0.01 МПа).

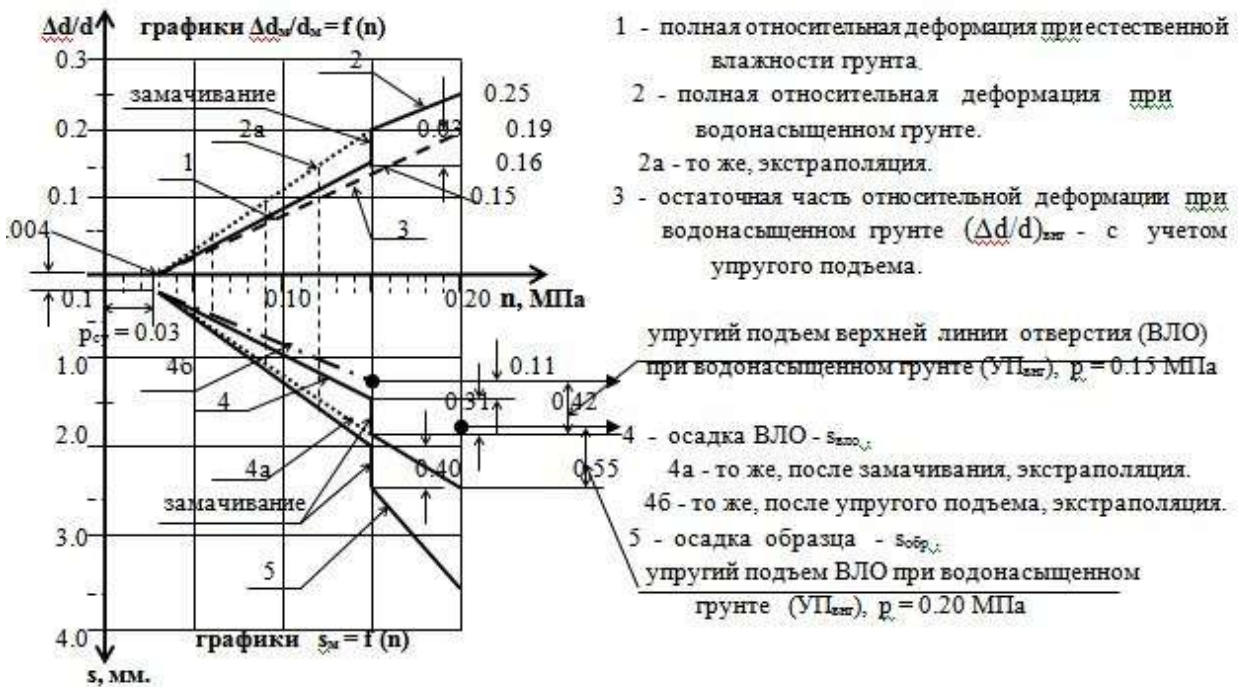


Рис. 8. Графики $(\Delta d_M/d_M) = f(n)$ и $s_M = f(n)$.

Из проведенных лабораторных испытаний следует:

1. При нагрузке $n = 0.15$ МПа :

- осадка образца до замачивания $s_{обр,евг} = 2.0$ мм.;
- осадка ВЛО до замачивания $s_{вло,евг} = 1.5$ мм.;
- упругий подъем ВЛО после замач. и разгр. $УП_{внг} = 0.42$ мм;

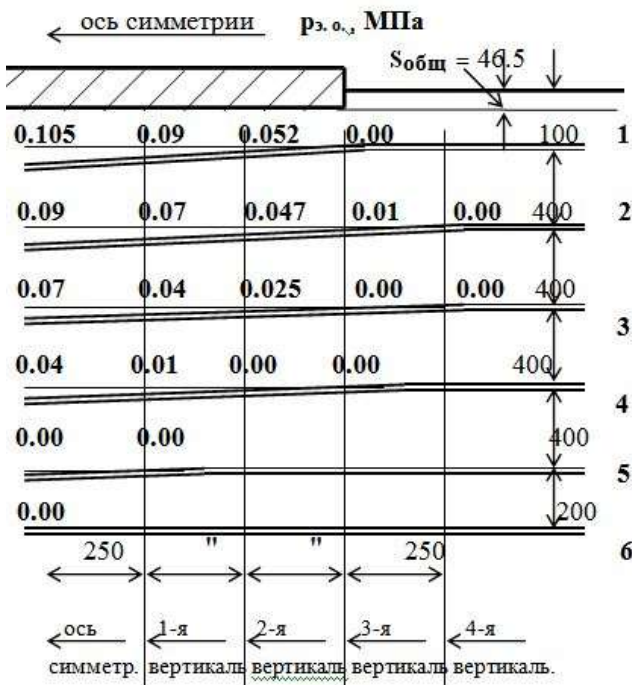
- осадка образца после замачивания $S_{обр,внг} = 2.4 \text{ мм. } (\Delta s = 2.40 - 2.0 = 0.40 \text{ мм.});$
- осадка ВЛО после замачивания $S_{вло,внг} = 1.81 \text{ мм. } (\Delta s = 1.81 - 1.5 = 0.31 \text{ мм.});$
- относительная деформация отверстия
 - полная, естеств. влажность грунта $(\Delta d/d)_{евг, п} = S_{вло,евг} / d = 1.50 : 9.5 = 0.16;$
 - полная, водонасыщенный грунт $(\Delta d/d)_{внг, п} = S_{вло,внг} / d = 1.81 : 9.5 = 0.19;$
 - остаточная, водонасыщенный грунт $(\Delta d/d)_{внг, о} = (S_{вло, внг} - УП_{внг}) / d = (1.81 - 0.42) / 9.5 = 0.15.$

2. При нагрузке $n = 0.20 \text{ МПа}$ (водонасыщенный грунт):
- осадка образца $S_{обр,внг} = 3.5 \text{ мм.};$
 - осадка ВЛО $S_{вло,внг} = 2.4 \text{ мм.};$
 - упругий подъем ВЛО после разгрузки $УП_{внг} = 0.55 \text{ мм.};$
 - относительная деформация отверстия
 - полная, водонасыщенный грунт $(\Delta d/d)_{внг, п} = S_{вло,внг} / d = 2.4 / 9.5 = 0.25;$
 - остаточная, водонасыщенный грунт $(\Delta d/d)_{внг, о} = (S_{вло, внг} - УП_{внг}) / d = (2.4 - 0.55) / 9.5 = 0.19.$
3. В диапазоне давлений $n = 0.03...0.20 \text{ МПа}$ графики осадок образца и относительных деформаций отверстия могут быть представлены, как линейные (погрешности менее 6 %).
4. Контрольные измерения положения нижней границы отверстия в образце после разгрузки показали отсутствие изменений (в пределах точности измерений).

Д. Распределение давлений в основании штампа.

а. Результаты реализации способа.

Полученные данные по относительным деформациям шпуров в натуре и график 3 $\Delta d/d = f(n)$ на рис. 8 дают возможность представить полную картину распределения давлений $p_{э,о,i}$ в точках координатной сетки под штампом в пределах ЗД, вблизи поперечной плоскости симметрии - рис. 9; в качестве иллюстрации приведено нахождение $p_{э,о,i}$ на вертикальной оси штампа - рис. 10.



шпур	$d_{шп, нач}$	$d_{шп, деф}$	Δd	$\Delta d/d_{шп, нач}$	$p_{э,о,i}$
1	23.3	20.3	3.0	0.13	0.135
2	"	20.7	2.6	0.11	0.12
3	"	21.3	2.0	0.086	0.10
4	"	22.2	1.1	0.05	0.07
5	"	23.2	0.1	0.004	0.03

1) МПа; за вычетом $p_{су} = 0.03 \text{ МПа}$.

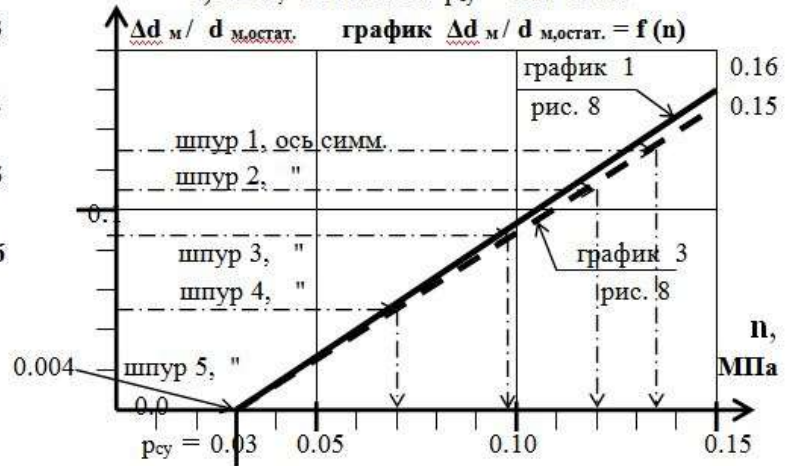


Рис. 9. Давления $p_{э,о}$ в основании штампа (поперечная плоскость симметрии).

Рис. 10. Определение давлений $p_{э,о}$ на вертикальной оси штампа.

Для этого, по замеренным под штампом величинам $d_{шп.деф}$ находились значения $\Delta d = d_{шп.нач} - d_{шп.деф}$, вычислялись отношения $\Delta d/d_{шп.нач}$ и по графику 3, рис. 8 определялись значения $p_{шп.i} = p_{o.i} - p_{cy}$ - полные давления, вызывающие остаточную деформацию грунта, а затем эффективные: $p_{э.o.i} = p_{o.i} - p_{cy}$. График 3 использовался для обеспечения подобия, т.к. в натуре замеры шпуров проводились в основании после разгрузки штампа и упругого подъема.

Рассмотрение рис. 9 позволяет установить:

1. Эффективное остаточное давление вблизи подошвы штампа соответствует действовавшему на поверхности штампа только в центре, по оси симметрии, и падает до нуля у границы ЗД. Общее давление в центре превышает действующее: $p = p_э + p_{cy} = 0.105 + 0.03 = 0.135 \text{ МПа} > p = 0.12 \text{ МПа}$.
2. Эффективные остаточные давления вблизи подошвы штампа - соответственно деформациям шпура 1 - распределяются вдоль нее также неравномерно: от максимума в центре до p_{cy} на границе; это коррелируется с результатами, полученными Г. Ривкиным (1967) при лабораторных испытаниях стальных штампов, оснащенных в подошве контактными датчиками давлений.

б. Сопоставление с нормативными источниками.

Графики давлений и осадок, построенные по нормативным документам и по результатам данного исследования для вертикальной оси симметрии штампа, показаны на рис. 11 - слева расположены графики давлений, справа графики осадок.

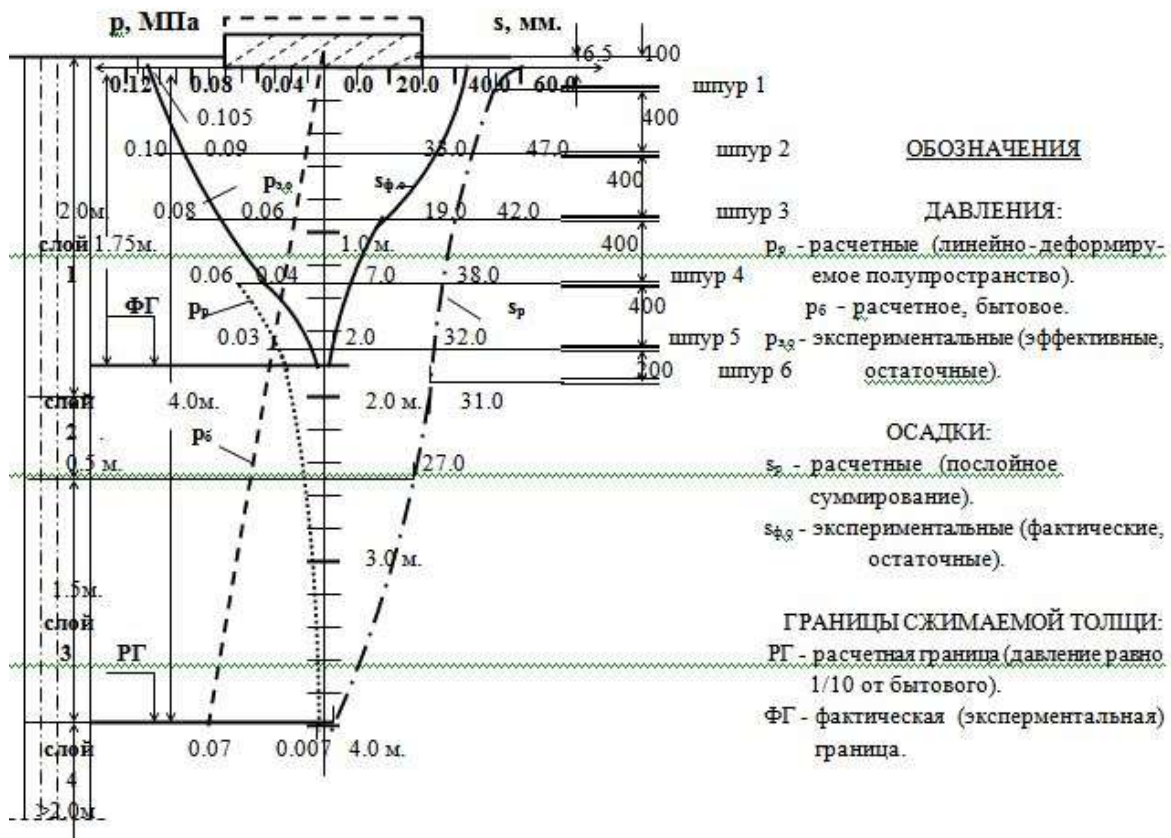


Рис. 11. Графики расчетных и экспериментальных давлений и осадок.

Сопоставление расчетных показателей с экспериментальными данными показывает:

1. Расчетная граница сжимаемой толщи расположена на глубине, в 2.3 раза большей, чем фактическая (коррелируется с результатами экспериментов В. Голубкова и других указанных выше авторов).
2. Расчетная общая осадка в 1.3 раза превышает фактическую.

3. Расчетные осадки в пределах фактической глубины сжимаемой толщи превышают установленные в эксперименте в 1.3 (подошва штампа)...16.0 (шпур 5) раз.

Е. Обсуждение результатов.

а. Идентичность условий деформаций шпуров при натурном и лабораторном испытании.

1. При обнажении шпуров в натуре отмечено уплотнение их стенок, что вызвано разницей в скоростях вращения бура и удаления грунта из пазов сверла - в то время как в лабораторном образце (ручное сверление) такое уплотнение отсутствует. Влияние этого момента на результаты может заключаться в получении меньших давлений в образце, необходимых для достижения одинаковых с натурой величин $\Delta d/d$, что преуменьшает полученные значения давлений в натуре. Для оценки такого влияния необходимо проведение дополнительных опытов. Устранения этого фактора может быть достигнуто либо путем придания пазам сверла расширяющейся к концам формы и увеличении разницы между диаметрами сверла и секций бура, либо подбором такого режима бурения отверстия в образце, при котором также достигается уплотнение стенок в пропорциональных натуре размерах.

2. Различные условия замачивания в образце и натуре - были такими лишь в первой стадии увлажнения грунта под штампом, затем, после водонасыщения, они стали одинаковыми – поэтому, этот момент не оказал влияния на идентичность деформирования шпуров.

б. Другие аспекты.

1. В модели p_{cy} определялось при естественной влажности грунта ($p_{cy,евг}$), и в основании штампа такие давления действовали до замачивания; по окончании замачивания значения p_{cy} - в силу снижения прочностных характеристик грунта – должны быть меньше ($p_{cy,внг} < p_{cy,евг}$).

Оценка значений $p_{cy,внг}$ может быть выполнена следующим образом. Как отмечалось выше (п. В, 2), ЗД под штампом имеет вид цилиндрического тела с полушариями в торцах и срезанными верхними секторами. Графическое построение на основе замеров (рис. 5) показало, что границы цилиндра и полушарий в торцах (в предположении, что здесь границы ЗД идентичны поперечным) описываются радиусом 1.06 м. Общая площадь поверхности ЗД равна: $A = 19.1 \text{ м}^2$ (вычисления опущены). Суммарная нагрузка на штамп: $N = 0.12 \cdot 3.0 \cdot 1.5 = 0.54 \text{ МН}$. Теперь, $p_{cy,внг} = N / A = 0.54 / 19.1 = 0.028 \text{ МПа} < p_{cy,евг} = 0.03 \text{ МПа}$ - данный результат может служить критерием достоверности и соответствия лабораторного испытания натурному. Вместе с тем, полученная разница достаточно мала для однозначного вывода о величине $p_{cy,внг}$ – это значение должно быть сопоставлено с лабораторным определением, для чего следовало испытать второй образец грунта с водонасыщением до приложения нагрузки.

2. При нагружении образца зафиксирована разница между его осадкой и осадкой верхней линии отверстия (ВЛО, рис. 8):

	$S_{обр}$, мм.	$S_{вло}$, мм.
$p = 0.15 \text{ МПа}$ до замачивания	2.0	1.5
после замачивания	2.4	1.8
$p = 0.20 \text{ МПа}$ “ “	3.5	2.4

Это свидетельствует о неравномерном сжатии образца по высоте, что фиксируется также и в основании штампа между смежными шпурами.

3. Имеющиеся данные по размерам ЗД позволяют проверить расчетную величину осадки по зависимости (3). Объем ЗД: $V_a = 9.3 \text{ м}^3$ (вычисления опущены). $V_s = A \cdot s = 0.21 \text{ м}^3$. $\epsilon_{об} = V_s : V_a = 0.0225$. $p_{э,внг} = p - p_{cy,внг} = 0.12 - 0.028 = 0.092 \text{ МПа}$ – средневзвешенный результат по рис. 9 равен 0.08 (с учетом «веса» шпура, как отношения каждого значения давления к нижележащему на вертикальной оси; например, для шпура 1: $0.105 \times (0.105 : 0.09) + 0.09 \times (0.09 : 0.07) + \dots$). $R_{гр.ср} = p_{э,внг} \cdot \epsilon_{об} = 0.002 \text{ МПа}$.

Теперь, осадка по (3): $s = R_{гр.ср} \cdot V_a / p_э \cdot A = 0.002 \cdot 9.3 / 0.092 \cdot 4.5 = 0.045$ м. – при фактической осадке 0.046 м.

4. Общие выводы.

1. Проведенный комплекс работ подтвердил возможность использования шпуров, пробуренных под штампом на связных грунтах, и их деформаций для получения величин давлений в нагружаемом основании.

2. Выведены зависимости между условием точности, диаметрами и количеством шпуров в модели (образце грунта) и натуре, а также зависимости для оценки точности измерений, позволяющие соблюсти условия моделирования процессов деформирования шпуров и учесть влияние погрешностей измерений на получаемые результаты.

3. Выполненные натурное и лабораторное исследования позволили установить зависимость между величинами «сплющивания» шпуров и значениями вызывающих эти деформации давлений в основании опытного штампа. Натурные испытания проведены на лессовых грунтах I типа просадочности, включающих нижерасположенный слой II типа просадочности. Отдельные результаты работы (глубина деформированной толщи, характер распределения давлений по подошве штампа) корреспондируются с результатами других авторов.

4. При выбранном предельном давлении на штамп - 0.12 МПа - деформации грунта под ним зафиксированы до глубины $1.2b$ (b – ширина штампа), по ширине до $2.8b$, в пределах зоны (зона деформации – ЗД), ограниченной в поперечном сечении поверхностью с радиусом $1.4b$. Сформировавшаяся ЗД разместилась в верхнем слое, что позволило исключить развитие просадочных явлений, несмотря на длительное и непрерывное замачивание основания.

5. Максимальное перемещение грунта зафиксировано под подошвой штампа, в его центре; эта величина меньше общей осадки штампа на 60%. Перемещения отдельных точек слоев под штампом неравномерны – по вертикалям от максимальных под подошвой до нуля на границе ЗД, по горизонталям также от наибольших значений на центральной вертикали до нуля на границе ЗД.

6. Получено распределение давлений для всей области деформированного грунта под штампом вблизи поперечной вертикальной плоскости симметрии. Давления в грунте по подошве штампа распределяются неравномерно – от максимального в центре до нуля по краям. Установлено наличие в грунте непосредственно под подошвой штампа на оси симметрии зоны «всплеска» давления, где оно превосходит действующую нагрузку на поверхности штампа – в условиях эксперимента на 12%.

7. Определенная в модельном испытании величина структурного сопротивления грунта уплотнению сопоставлена с такой величиной в натуре, полученной в итоге вычислений с использованием установленных размеров ЗД – результаты дают удовлетворительную сходимость.

8. Сравнения вычисленных по нормативным документам величин с экспериментальными данными показали наличие расхождений: для глубины сжимаемой толщи – в 2.3 раза; для общей осадки – в 1.3 раза. Вычисление величины осадки по имеющейся зависимости с использованием размеров ЗД дает полное совпадение с осадкой, полученной в эксперименте.

9. На основе выполненного исследования были разработаны рекомендации к проектированию фундаментов для строительства цеха. Использование рекомендаций позволило снизить стоимость работ по фундаментам на 45% и сократить сроки их устройства на 2 месяца.