

## **НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ШЕЛЬФОВОГО ГЛИНИСТОГО ГРУНТА В КОНТАКТНОМ СЛОЕ ПОД ПОДОШВОЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ**

Асланов Л.Ф.

Азербайджанский архитектурно-строительный университет  
г. Баку, Азербайджан

**АНОТАЦІЯ:** Розглянуто напружений стан шельфових ґрунтів у контактному шарі під подошвою буро набивних паль великого перерізу у вигляді експерименту на лотках. Встановлено зміни нормальних вертикальних, горизонтальних та похилих, а також дотичних компонентів напруг, як по краям, так і по середині подошви пальових фундаментів.

**АННОТАЦИЯ:** Рассмотрено напряженное состояние шельфовых грунтов в контактном слое под подошвой буронабивных свай большого сечения в виде эксперимента на лотках. Установлены изменения нормальных вертикальных, горизонтальных и наклонных, а также касательных компонентов напряжений, как по краям, так и посередине подошвы свайных фундаментов.

**ABSTRACT:** The state of stress in the offshore contact layer of soil under the base of bored piles in a large section of the experiment on the stalls is examined. Changes of normal vertical, horizontal and inclined, as well as shear stress components, as on the edges and in the middle of the foot pile foundations are determined.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Шельфовый глинистый грунт, буронабивная свая, свайной фундамент.

С целью повышения надежности возводимых морских сооружений на буронабивных сваях большого сечения с «жестким сердечником» рассмотрим распределение напряжений под подошвой свайных фундаментов в основаниях контактного слоя со сваями, где шельфовые грунты состоят из глинистых твердых суглинков нарушенной структуры.

Образцы шельфового грунта были взяты из дна Каспийского моря на глубине 300...304 м от поверхности моря, с помощью бурильного оборудования. При этом глубина от поверхности моря до дна составляла 164 м и заглубление свай для морских сооружений на шельфовых грунтах запланировано 140 м.

Взятые пробы из оснований шельфовых грунтов были проверены в лабораторных условиях и установлены следующие показатели:

предел текучести  $W_L=0,245$ ; предел раскатывания  $W_p=0,122$ ; природная влажность  $W=0,15$ ; число пластичности:  $I_p= W_L-W_p=0,245-0,122=0,123$ , так как  $0,07 < I_p=0,123 < 0,17$  – грунт **суглинок**; показатель

консистенции  $I_L = \frac{W - W_p}{W_L - W_p} = \frac{0,150 - 0,122}{0,245 - 0,122} = \frac{0,028}{0,123} = 0,228$ , так как

$0 < I_L = 0,228 < 0,25$  - **суглинок полутвердый**; удельный вес частицы

$\gamma_s=26,9$  кН/м<sup>3</sup>; удельный вес грунта  $\gamma=19,5$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент пористости

$e_0 = \frac{\gamma_w}{\gamma} 1 + W - 1 = \frac{26,9}{19,5} 1 + 0,15 - 1 = 0,586$ ; степень влажности

$S_r = \frac{W \cdot \gamma_s}{\gamma_w \cdot e_0} = \frac{0,15 \cdot 26,9}{10 \cdot 0,586} = 0,689$ , так как  $0,5 < S_r = 0,689 < 0,8$  -

**шельфовый грунт суглинок полутвердый и влажный.**

Модуль деформации по результатам компрессионных испытаний составил  $E_k = 8,26$  МПа или в натуре  $8,26 \cdot 4,5 = 37,17$  МПа. Характеристики прочности устанавливались с помощью прибора одноплоскостного среза (угол внутреннего трения  $\varphi = 26^\circ$ , сила сцепления  $C = 0,04$  МПа). Модуль деформации в натуре будет из компрессионного модуля, умноженного на коэффициент корректировки  $m_k$ , при  $e_0 = 0,586$ ,  $m_k = 4,5$  для суглинка. Тогда модуль деформации будет  $E = E_k \cdot m_k = 8,26 \cdot 4,5 = 37,17$  МПа.

Однородность основания проверялась путем отбора проб на влажность и плотность, так что грунт является **однородным**.

Грунт укладывается в лоток слоями толщиной 30 см с уплотнением ручной трамбовкой. Плотность контролировалась по объему уложенного в лоток грунта, которая соответствовала по удельному весу  $\gamma=19,5$  кН/м<sup>3</sup> в состоянии природного шельфового грунта суглинка. Однородность основания проверялась периодически отбором проб на влажность  $W=0,15$  и плотность  $\gamma=19,5$  кН/м<sup>3</sup>.

Лоток был изготовлен из листовой стали толщиной 10 мм, размерами: длиной –  $l = 2,0$  м, высотой –  $h = 2,6$  м, шириной –  $b = 0,6$  м (рис. 1).

Были изготовлены круглые деревянные плиты  $d_n = 350$  мм из досок  $\delta = 15$  мм – 6 шт. и в поверхности были закреплены 14 шт. месдозы в каждой плите, из них 4 шт. наклонные (под углом  $45^\circ$  к вертикали), 4 шт. вертикальные и 4 шт. горизонтальные.

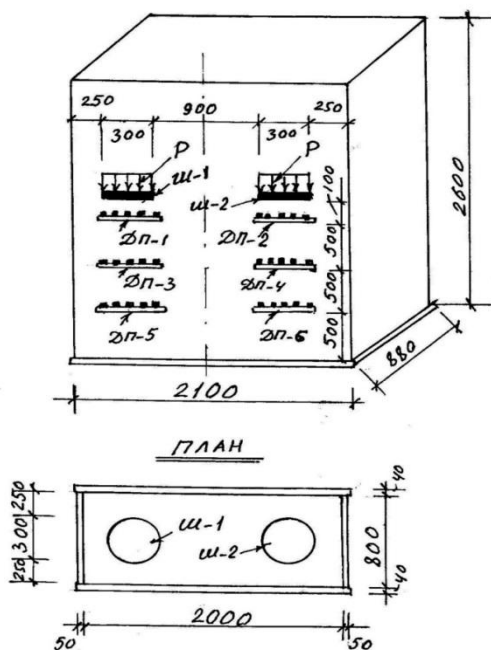


Рис. 1. Размещение деревянной плиты ДП-1 - ДП-6 с месдозами по высоте слоя шельфового грунта под жесткими штампами Ш-1 и Ш-2 внутри металлического лотка размерами в чистоте 2,0x0,8x2,6 м

Эти месдозы позволили измерять контактные напряжения в грунте под жестким штампом и через 0,5 м по слоям в глубине: вертикальные  $\sigma_z$ , горизонтальные  $\sigma_x$  и наклонные  $\sigma_n$  напряжения. Схема установления месдозы на деревянной плите показана на рис. 2.

Были изготовлены жесткие штампы из металлической стали толщиной  $\delta = 40$  мм, диаметром 300 мм – 2 шт. (рис. 3).

Размещение деревянной плиты с закрепленными месдозами внутри лотка через 0,5 м по высоте слоя показано на рис. 1, в котором симметрично над деревянными плитами с месдозой, на 100 мм выше размещены жесткие штампы Ш-1 и Ш-2.

Жесткие штампы Ш-1 и Ш-2 размещались в лотке с соблюдением размеров, как показано на рис. 1, и на них передавались гидравлическим домкратом вертикальные нагрузки, которые имитируют передачи нагрузки от буронабивных или буруинъекционных свай большого сечения с «жестким сердечником».

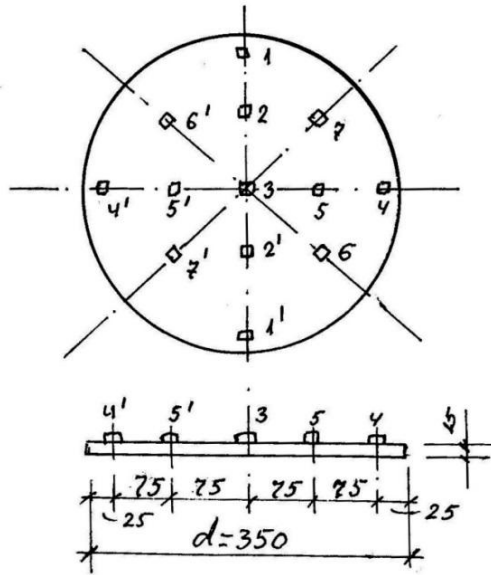


Рис. 2. Расположение мессодзы в деревянной плите, всего 14 мессодзы на одной плите. Таких было изготовлено 6 шт. ДП-1 - ДП-6 и размещены в них  $6 \times 14 = 84$  шт. мессодзы

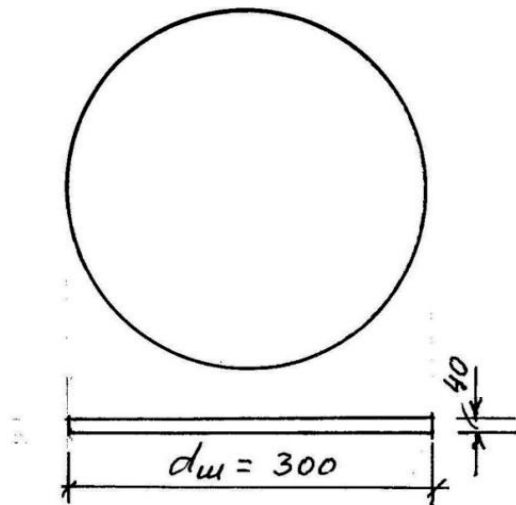


Рис. 3. Жесткий штамп из металлического листа  $\delta = 40$  мм

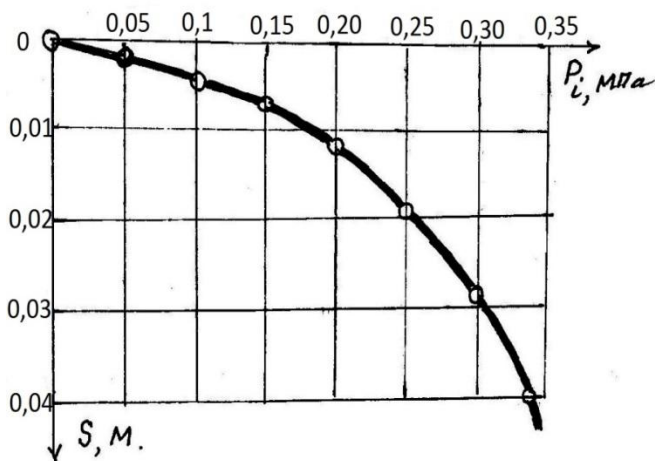


Рис. 4. График осадки жесткого штампа

Напряжения в грунте измеряли месдозами диаметром 0,035 м и толщиной 0,005 м с параллельно-поступательным перемещением рабочей поверхности. Месдозы были закреплены к плитам из досок круглого сечения диаметром 350 мм толщиной доски 15...20 мм. Расположение месдозы показано на рис. 2.

Для измерения вертикального и наклонного (под углом  $45^\circ$  к вертикали) контактных напряжений в основании буронабивных свай, были использованы 4 наклонные, 4 вертикальные и 4 горизонтальные месдозы, закрепленные в плитах (рис. 2).

Месдозы были соединены с регистрирующими приборами ИСН-20 м и ИД-70, в основе конструкции которых использован мост Уитстона.

Тарировка месдоз осуществлялась в баке диаметром 0,44 м и высотой 0,14 м, заполненном исследуемым шельфовым суглинком. Плотность суглинка в баке соответствовала плотности шельфового грунта, на который будут опираться буронабивные сваи большого сечения для морских сооружений.

Для тарировки месдозы закладывали в бак рабочей поверхностью вверх на глубину 0,01 м, которая соответствовала глубине засыпки под штампами (сваями) для месдозы. При засыпке 0,01 м грунтом соответствует зона контакта штампа (свай) с грунтовым основанием. Исследования показали, что при таком расположении месдоз их деформации соответствуют деформациям, происходящим в контактной зоне грунта под сваями (штампами).

Размеры лотка и большая жесткость стен позволили создать условия пространственной деформации нарушенной структуры с плотностью шельфовых грунтов и заполнить лоток до верха шельфовыми суглинками послойно толщиной 30 см и уплотнять вручную до получения однородного грунтового слоя высотой 2,6 м. Исследования выполнялись в лотке, изготовленном из металлических листов толщиной  $\delta = 10$  мм и размерами: шириной 0,6 м, длиной 2 м и высотой 2,6 м.

Нагрузки производили ступенями по 0,1 МПа с выдержкой на каждой ступени 1 час. Тарировка проводилась при трехкратной повторности. Наибольший разброс (до 5%) позволил осреднить результаты тарировки. Тарировочные графики имели вид практически прямых линий.

Всего было использовано 84 мессдозы в точках  $1 \dots 14 * 6 = 84$ , но были расположены симметрично в деревянных плитах.

Показания мессдоз, расположенных вертикально и наклонно в контактной зоне (ДП-1 и ДП-2), обрабатывались по тарировочным графикам этих же мессдоз, расположенных горизонтально в соответствии с ранее проведенными исследованиями по тарировке.

Для измерения контактных напряжений (ДП-1 и ДП-2) в грунте были проведены две серии испытаний. Измерялись нормальные напряжения в плоскости возможных деформаций грунта ( $\sigma_x$  – горизонтальные;  $\sigma_z$  – вертикальные;  $\sigma_n$  – наклонные под углом  $45^\circ$  к вертикали). Одновременно замерялись напряжения в ДП-3, ДП-4, ДП-5 и ДП-6 – затухание этих напряжений по глубине слоев (здесь не даны эти показатели).

Во всех испытаниях мессдозы устанавливались в одних и тех же точках в параллельных рядах, расположенных поперек подошвы штампа в 14 мессдоз. Схема установки мессдоз на примере горизонтально-расположенных показана на рис. 2. Уложенные мессдозы (закрепленные на плиты из досок круглой формы) прикрывались слоем шельфового грунта 10 см под подошвой штампа будущих буронабивных свай и осторожно уплотнялись легкой трамбовкой. Поверхность выравнивалась шаблоном так, чтобы над мессдозами оставался слой грунта толщиной 1 см. На подготовленную поверхность устанавливался жесткий металлический штамп круглого сечения диаметром  $d=300$  мм и толщиной 40 мм и на него передавалась гидравлическим домкратом вертикальная нагрузка.

Перемещения штампа фиксировались двумя прогибомерами 6ПАО-ЛИСИ. Загружения производилось ступенями по 0,05 МПа до  $P_i = 0,35$  МПа, соответствующей условиям, близким к предельному состоянию данного шельфового грунта, используемого для оснований под буронабивными сваями морских сооружений. Условия продолжительности стабилизации осадок штампа на каждой ступени принимались равными 1 ч., после

чего снимались отсчеты по приборам и велись визуальные наблюдения за поверхностью грунтового основания под штампом в лотке.

Во всех опытах при  $P_i = 0,20$  МПа на свободной поверхности основания под штампом (диаметром  $d_{ш} = 300$  мм) появились мелкие трещины, параллельные граням штампа. Характер этих трещин примерно одинаков; первые трещины появились на расстоянии  $0,04...0,05$  м от граней штампа, при дальнейшем увеличении нагрузки –  $P_i = 0,15...0,2$  МПа от штампа. При  $P_i = 0,30$  МПа раскрытие ближних к штампу трещин составляло около  $0,0025$  м. При  $P_i = 0,35$  МПа штамп врезался в грунт на  $0,026...0,032$  м. Раскрытие трещин, их характер, а также значительные перемещения штампа свидетельствуют о локальных разрушениях суглинистого основания под штампом (или под буронабивными сваями), начинающихся уже при сравнительно небольших нагрузках или при давлениях  $P_i = 0,35$  МПа.

График зависимости осадок штампа от нагрузки близок к линейному в интервале давлений  $P_i = 0; 0,05; 0,1$  МПа, а далее он переходит в нелинейный, как показано на рис. 5.

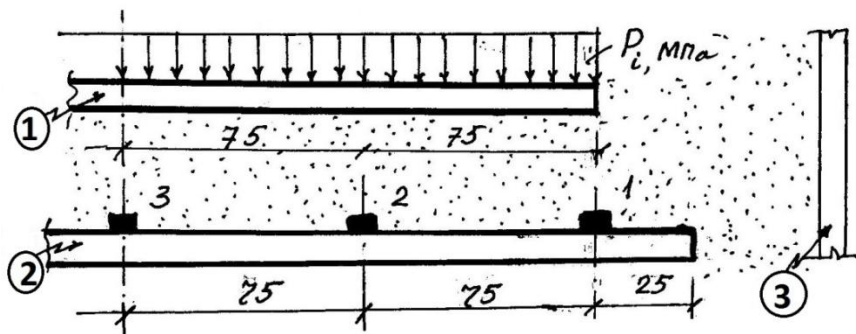


Рис. 5. Расчетная схема действия нагрузки через половину штампа на половину деревянной плиты с месдозами 1, 2, 3 от края: 1 – штамп; 2 – деревянные плиты; 3 – стенки лотка; месдозы 1, 2, 3

Начальная критическая нагрузка  $Q_H^k$ , которая вычисляется по формуле Пузыревского [5], составила  $Q_H^k = 0,26$  МПа, что значительно превышает нагрузку, до которой график осадок остается линейным (при  $P_i = 0,1$  МПа).

На рис. 6 представлены осредненные эпюры измеренных компонентов напряжений. Основанием для осреднения являлись условия пространственной деформации основания и симметричность нагружения штампа. Таким образом, для точек 1...14 получено по 28 значений

мессдозы по Ш-1=14 шт. и Ш-2=14 шт., каждого из измеренного компонента напряжений.

На рис. 6 приведены эпюры напряжений в контактном слое от ДП-1 (рис. 2) при нагрузках (давлениях на жесткий штамп)  $P_i = 0,05; 0,2; 0,35$  МПа в точках 1, 2, 3 в половине ДП-1. Из рис. 6 видно, что характер распределения измеренных напряжений по диаметру штампа  $d_{ш} = 300$  мм несколько равномернее в начале его загрузки. По мере увеличения внешней нагрузки происходит некоторая трансформация эпюр при более интенсивном возрастании краевых ординат эпюр  $\sigma_n, \tau_{zx}$  и промежуточных – на эпюре  $\sigma_x = \sigma_y$ . Это свидетельствует о сравнительно слабом перераспределении напряжений под подошвой жесткого штампа в процессе роста нагрузки.

При внешних нагрузках  $p < 0,20$  МПа в рассматриваемых точках 1..3 контактного слоя сохраняется линейный характер нарастания всех компонент напряжений. При  $p > 0,2$  МПа в точках 1 и 3 зафиксировано снижение интенсивности увеличения горизонтальных напряжений  $\sigma_x = \sigma_y$ , примерно 5 ... 8%, при этом наиболее чувствительными к появлению в грунте сдвигов оказались напряжения в горизонтальных осях  $x$  и  $y$ , т.е.  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ .

Зафиксированные значения максимальных осадок штампа, составившие  $0,1d_{ш}$  (где  $d_{ш}$  – диаметр штампа, в наших случаях  $d_{ш} = 0,3$  м), уже можно считать соответствующими состоянию, равному или очень близкому к предельному по устойчивости основания. Касательные напряжения  $\tau_{zx}$  в контактном слое вычислены по измеренным  $\sigma_z, \sigma_n, \sigma_x$ . По мере увеличения нагрузки на штамп форма эпюр  $\tau_{zx}$  не изменяется (рис. 7).

При внешних нагрузках  $p < 0,20$  МПа в рассматриваемых точках 1..3 контактного слоя сохраняется линейный характер нарастания всех компонент напряжений. При  $p > 0,2$  МПа в точках 1 и 3 зафиксировано снижение интенсивности увеличения горизонтальных напряжений  $\sigma_x = \sigma_y$ , примерно 5 ... 8%, при этом наиболее чувствительными к появлению в грунте сдвигов оказались напряжения в горизонтальных осях  $x$  и  $y$ , т.е.  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ .

Зафиксированные значения максимальных осадок штампа, составившие  $0,1d_{ш}$  (где  $d_{ш}$  – диаметр штампа, в наших случаях  $d_{ш} = 0,3$  м), уже можно считать соответствующими состоянию, равному или очень близкому к предельному по устойчивости основания. Касательные напряжения  $\tau_{zx}$  в контактном слое вычислены по измеренным  $\sigma_z, \sigma_n, \sigma_x$ . По мере увеличения нагрузки на штамп форма эпюр  $\tau_{zx}$  не изменяется (рис. 7).



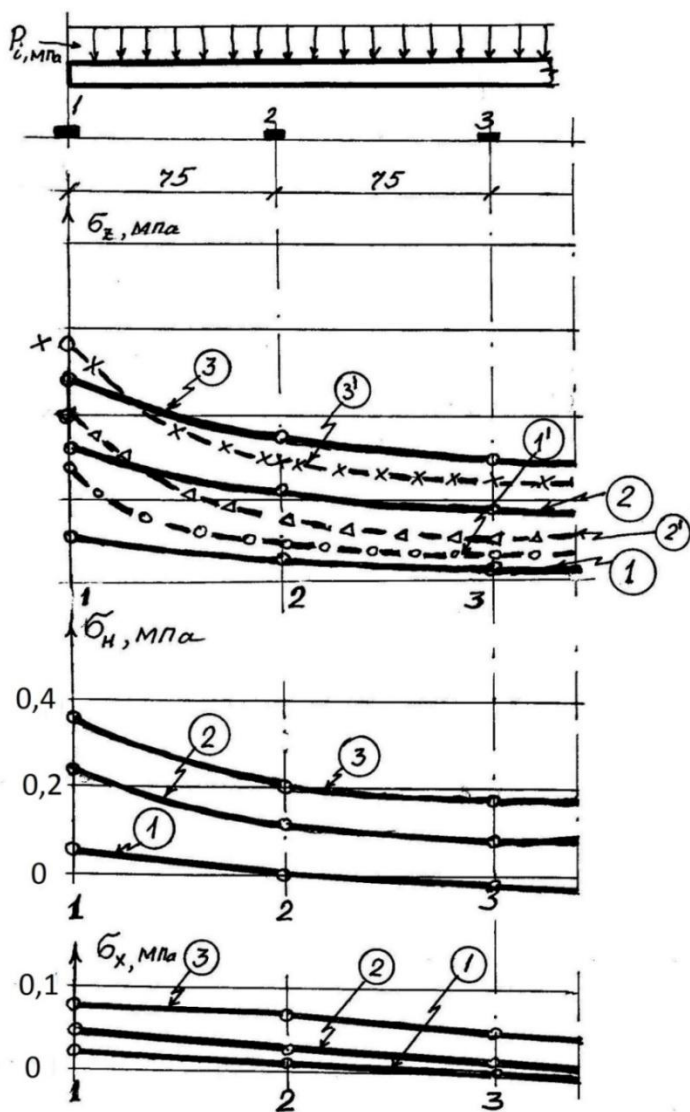


Рис. 6. Эпюры напряжений в контактном слое шельфового суглинка при нагрузке  $P_i = 0,05$  МПа (кривая №1);  $P_i = 0,2$  МПа (кривая №2);  $P_i = 0,35$  МПа (кривая №3). Значения  $\sigma_z$  при использовании решений теории линейно-деформируемой среды для условий пространственной деформации шельфовых грунтов под жестким штампом, те же, давления  $P_1 = 0,05$  МПа;  $P_2 = 0,2$  МПа;  $P_3 = 0,35$  МПа

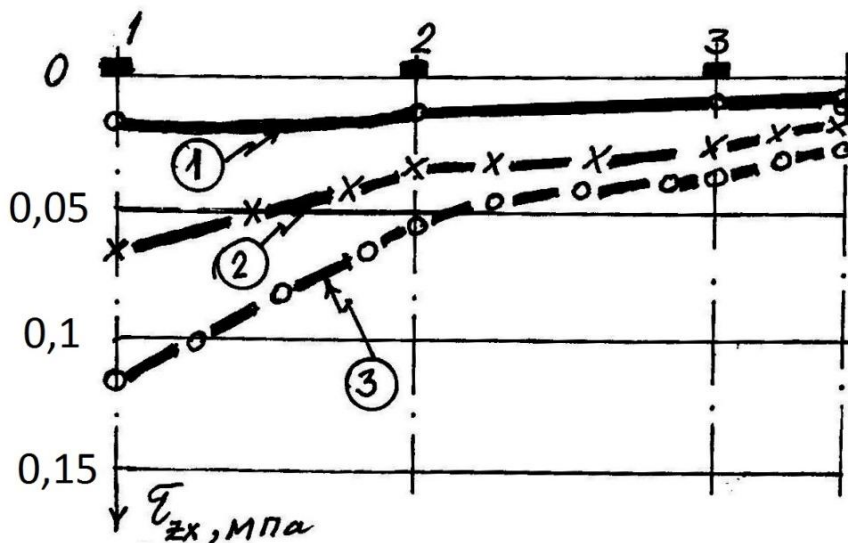


Рис. 7. Трансформирования эпюр касательных компонент напряжений  $\tau_{zx}$  при нагрузках  $P = 0,05$  МПа (сплошная линия 1),  $P = 0,2$  МПа (пунктирная линия с обозначением «х», линия 2),  $P = 0,3$  МПа (штрихпунктирная линия 3): 1, 2, 3 номера точки мессдозы

Максимальные по модулю значения  $\tau_{zx}$  и максимальная интенсивность их возрастания зафиксированы у краев штампа, на оси симметрии эпюра переходит через нуль. Касательные напряжения, действующие на подошву кругло-листового штампа, направлены от оси симметрии штампа.

Распределение главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_3$ , вычисленных по измеренным, аналогично распределению  $\sigma_2$  и  $\sigma_x$  соответственно ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Это является следствием того, что главные площадки в контактной зоне мало отклонены от вертикальных и горизонтальных направлений. Так, вычисленный по известным зависимостям угол отклонения  $\alpha_0$  напряжения  $\sigma_1$  от вертикали в точке 1 составляет примерно  $8^\circ$  и при возрастании нагрузки на штамп не изменяется. С приближением к оси симметрии значение  $\alpha_0$  убывает и в точке 3 направление  $\sigma_1$  при любой нагрузке практически вертикально (примерно  $\alpha_0 = 3,5^\circ$ ), что соответствует условиям симметричного нагружения штампа. В точках от 2 до 3 значения  $\alpha_0$  принимают промежуточные значения.

По измеренным нормальным напряжениям, используя условия пространственной деформации оснований из шельфовых грунтов (в

данном случае из суглинков), можно вычислить коэффициент Пуассона  $\mu_0$  грунта по формуле  $\mu_0 = \sigma_y / (\sigma_x + \sigma_z)$ .

Следует отметить, что в различных точках контактного слоя значения  $\mu_0$  неодинаковы: в точке 1 значение  $\mu_0 = 0,23$ , в точке 3 – величина около  $\mu_0 \approx 0,25$  (рис. 8).

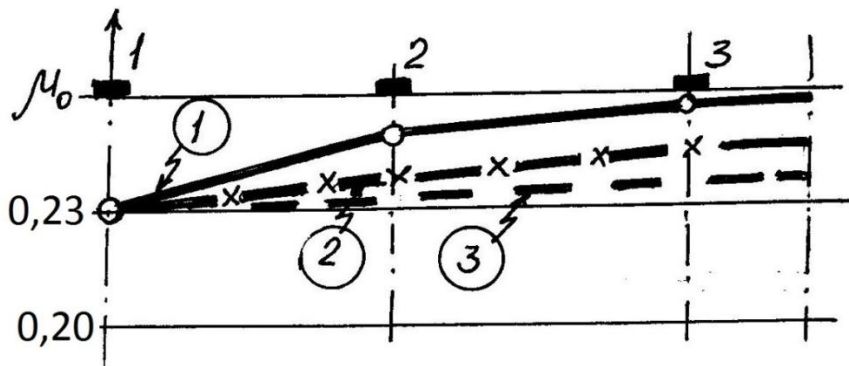


Рис. 8. Трансформация эпюр изменения коэффициента Пуассона при увеличении нагрузки от  $P = 0,05$  МПа до  $P = 0,30$  МПа. При  $P = 0,05$  МПа (сплошная линия, 1),  $P = 0,2$  МПа (пунктирная с обозначением «х», линия 2),  $P = 0,3$  МПа (штрих-пунктирная линия, 3). Начальное значение коэффициента Пуассона для шельфового суглинка  $\mu_0 = 0,23$

Степень приближения напряженного состояния к предельному в различных точках контактного слоя оцениваем по изменению угла  $\theta_{max}$  наибольшего отклонения полного давления, действующего на рассматриваемую в шельфовом грунте площадку, от нормали к этой площадке. Угол  $\theta_{max}$  вычисляем по формулам теории напряжений. С увеличением внешней нагрузки от  $P=0,05$  МПа до  $P=0,35$  МПа угол  $\theta_{max}$  в точке 1 возрастает с  $4^\circ$  до  $38^\circ$ , в остальных точках он изменяется в среднем от  $3^\circ$  до  $16^\circ$ . Как видно, наиболее интенсивно напряженное состояние приближается к предельному в точках, расположенных у краев штампа, например, в точках 1, 1', 1'', 4, 4', 4'' (рис. 2).

На рис. 9 показаны траектории возрастания обобщенных нормальных напряжений  $\sigma_{cp} = \sigma_1 + \sigma_3$  и касательных напряжений  $\tau_i^{пл.} = \sigma_1 - \sigma_3$  в различных точках контактного слоя от края - точка 1 до середины точка 3 (рис. 2).

Из рис. 9, а также из анализа ранее приведенных данных следует, что до  $P=0,2$  МПа интенсивность роста  $\tau_i^{пл.}$ , обуславливающая степень приближения напряженного состояния к предельному, наиболее высока не

только вблизи края (точка 1), но и в средней части подошвы (точка 3). При дальнейшем увеличении нагрузки интенсивность роста  $\tau_i^{пл}$  претерпевает качественные изменения: в точке 1 сдвиговые напряжения  $\tau_i^{пл}$  начинают расти с большой интенсивностью, а в точке 3 наоборот, появляется тенденция к их затуханию.

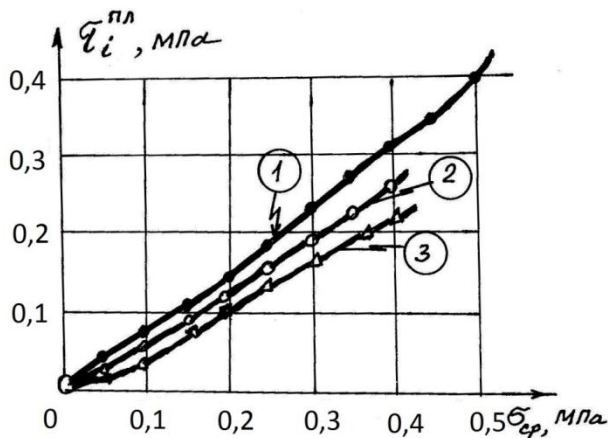


Рис. 9. Траектория возрастания нормальных  $\sigma_{ср}$ , МПа и касательных  $\tau_i^{пл}$ , МПа напряжений в точках от края 1 до средней точки 3 контактного слоя под жестким штампом, имитирующим буронабивные или буроинъекционные сваи большого сечения с «жестким сердечником». Кривые 1, 2, 3 показывают в точках 1, 2, 3 мессдозы

Практически линейные при исследованных нагрузках графики нарастания обобщенных напряжений  $\sigma_{ср}$  и  $\tau_i^{пл}$  для всех точек позволяют считать нагружение шельфового грунта в каждой отдельной точке контактного слоя простым. Ввиду различия угла наклона графиков к осям координат в разных точках возможно появление для последних неодинаковых параметров или закономерностей, связывающих напряжения и деформации.

Равномерный характер эпюр измеренных напряжений вдоль штампа, а также образования трещин на поверхности основания из шельфовых грунтов (на примере суглинка) при возрастании нагрузки (от 0,05 МПа до 0,35 МПа) строго поперек лотка показывают, что условия пространственной деформации при нагружении штампа круглого сечения в опытах выполнялись на достаточно высоком уровне. Показателем достоверности результатов исследований также является вертикальное

направление вычисленных главных напряжений в точке 3 (в середине штампа) и равенство нулю касательных напряжений  $\tau_{zx}$  в этой точке.

Сопоставляя полученные результаты с данными других авторов [1 - 6], можно отметить, что эпюры вертикальных контактных напряжений с максимальными ординатами по краям жесткого штампа круглого сечения диаметром  $d_{ш} = 300$  мм очень близки с эпюрами напряжений этих авторов.

Следует отметить, что в шельфовом суглинке, как и в глинистых грунтах, из-за сил связности развитие зон сдвигов по краям штампа происходит позже и медленнее, чем в несвязных песчаных грунтах. К тому же для шельфовых глинистых грунтов характерно появление разрывов сплошности среды у поверхности основания вблизи граней штампа. Отсюда и различие в форме эпюр: в шельфовых песчаных основаниях минимальные ординаты находятся под гранями штампа и при возрастании нагрузки уменьшаются, тогда как в глинистых основаниях наблюдается сравнительно интенсивный рост напряжений в этих же точках при большом диапазоне изменения нагрузок.

На рис. 6 пунктиром показаны эпюры  $\sigma_z$ , построенные с использованием решений теории линейно деформируемой среды для условий пространственной деформации под жестким штампом оснований из шельфовых грунтов в наших случаях из суглинка с действием тех же давлений  $P_1 = 0,05$  МПа,  $P_1 = 0,2$  МПа,  $P_1 = 0,35$  МПа.

Наряду с удовлетворительной сходимостью в очертаниях экспериментальных и теоретических эпюр, имеются некоторые различия, обусловленные развитием зон сдвигов в реальном шельфовом грунте преимущественно под гранями штампа: ординаты эпюр  $\sigma_z$ , построенных по экспериментальным данным, в средней части больше, чем расчетных. Эпюра  $\sigma_z$  на всем диапазоне изменения нагрузок не меняет очертания, а экспериментальные с ростом нагрузки трансформируются – отношения крайних ординат относительно к центральным уменьшаются от 1,72 до 1,5 раза. Наибольшие значения касательных напряжений у граней штампа достаточно велики и составляют  $\tau_{zx} = (0,15 \dots 0,2)\sigma_z$ . Максимальные значения ординат  $\sigma_{zmax} = 0,06 \dots 0,1 \cdot 0,5d_{ш}$  от края штампа и в несколько раз превышают центральную ординату эпюры. При этом краевые ординаты несколько меньше максимальных, но всегда больше центральных. С ростом нагрузки очертания эпюр  $\sigma_z$  выравниваются, что соответствует приведенным результатам. В наших опытах крайние месдозы (рис. 2) располагались в 25 мм от края штампа.

Таким образом, проведенные опыты позволили определить компонент напряжений  $\sigma_z, \sigma_x = \sigma_y$  и  $\tau_{zx} = \tau_{zy}$ .

Из вышеприведенного можно сделать выводы:

1. Эпюры вертикальных напряжений  $\sigma_z$  в контактном слое шельфового глинистого грунта имеют вогнутую форму, которая с ростом нагрузки уменьшается. Значение горизонтальных  $\sigma_y$  и  $\sigma_x$  в соответствующих точках существенно (примерно до 4 раз) меньше  $\sigma_z$ . Наибольшие значения  $\tau_{zx}$  у граней штампа в наших опытах для шельфовых грунтов, на примере суглинка составили  $\tau_{zx} = 0,25\sigma_z$  и действуют на подошву штампа по направлению от оси симметрии его.

2. Зависимости  $\sigma_{cp} \sim \tau_i^{пл.}$  для исследованных точек контактного слоя близки к линейным (при простом нагружении). В связи с различными в траекториях нарастания напряжений в разных точках контактного слоя, физические уравнения связи напряжений и деформаций нельзя описать единым аналитическим выражением.

3. Величина компонент напряжений  $\sigma_z$ ,  $\sigma_x = \sigma_y$  и  $\tau_{zx}$  в соответствующих точках, находящихся в глубине лотка ДП-3 и ДП-4, ДП-5 и ДП-6 (рис.1) уменьшается в зависимости от глубины расположения, но форма эпюр остается по аналогии рис.6.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Криворотов А.П. Напряженное состояние песчаного основания под подошвой незаглубленного штампа / Криворотов А.П. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1969. – №1. – С. 11-14.
2. Криворотов А.П. О распределении касательных напряжений в зоне формирования грунтового ядра / Криворотов А.П. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – №1. – С. 35-37.
3. Федосеева Л.В. Влияние изменений напряженного состояния глинистого грунта на показания податливых грунтовых месдоз / Федосеева Л.В. // Изв. Вузов: сер. Стр-во и архитектура. – 1986. – №7. – С. 125-126.
4. Федоровский В.Г. Жесткий штамп на нелинейно деформируемом связном основании (плоская задача) / Федоровский В.Г., Кагановская С.Е. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – №1. – С. 41 - 45.
5. Флорин В.А. Основы механики грунтов. - Т.1 / Флорин В.А. – М.: Гостройиздат, 1959. – 356 с.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов / Цытович Н.А. – М.: Высшая школа, 1983. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 12.09.2013 г.