

УДК 624.131

UDC 624.131

РАСЧЕТ ОСАДКИ ОСНОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ ШТАМПОМ

THE CALCULATION OF THE FOUNDATION SETTLEMENT OVER THE PLATE INVESTIGATION DATA

Ляшенко Павел Алексеевич
к. т. н., профессор
Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия

Lyashenko Pavel Alekseevich
Cand.Tech.Sci., professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Денисенко Виктор Викторович
к. т. н., доцент
Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Denisenko Viktor Viktorovich
Cand.Tech.Sci., assistant professor
Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Дано обоснование моделирования деформаций основания фундамента путем испытания штампом. Приведены критерии подобия и отвечающие им формулы для расчета приращений осадки по заданным приращениям давления на подошве фундамента. Предложен новый принцип определения допустимого давления на основание

The basis of foundation settlement modeling over the plate testing has been offered. The similarity criteria were formulated so as the formulas for settling increments calculation versus to setting pressure increments on the base of foundation. New principle of admissible pressure on the base of foundation has been suggested

Ключевые слова: ОСАДКА ОСНОВАНИЯ, ИСПЫТАНИЕ ШТАМПОМ, ДАВЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТА, КРИТЕРИИ ПОДОБИЯ, МИКРОСТРУКТУРА, КОНТАКТЫ, НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, ДОПУСТИМОЕ ДАВЛЕНИЕ

Keywords: FOUNDATION SETTLEMENT, PLATE TESTING, FOUNDATION PRESSURE, SIMILARITY CRITERIA, MICROSTRUCTURE, BEARING CAPACITY, ADMISSIBLE PRESSURE

Введение

Расчет осадки основания жесткого фундамента производится методом послойного суммирования, при условии, что среднее давление на подошве не превышает расчетного сопротивления, которое вычисляется из условия ограничения размеров областей предельного состояния грунта под краями фундамента [1]. Методика расчета осадки никак не связана с этим ограничением и опирается на оценку компрессионного сжатия тонкого слоя грунта, а сжимающее давление рассчитывается по теории линейно-деформируемого полупространства. Обе теории допускают грубую идеализацию грунта: по первой грунт представляется идеальным газом, по второй – сплошной однородной средой. Обе не учитывают временной фактор – скорость нагружения основания.

Применение разных механических моделей к расчету одной величины делает его ненадежным и заставляет вводить поправочные коэффициенты, а также искать альтернативные пути решения (как, например, метод эквивалентного слоя [1], еще более оторванный от физической сути деформации грунтов). Для повышения надежности расчетов основания испытываются штампом.

Испытание оснований штампом площадью 5000 см^2 и 10000 см^2 считаются эталонными при инженерно-геологических изысканиях для строительства. Данные испытания – зависимость осадки штампа от давления на подошве – используются затем для определения значения модуля общей деформации грунта, используемое далее для расчета осадки основания фундамента – методом послойного суммирования.

Условия подобия осадки штампа и фундамента отсутствуют, и это лишает возможности непосредственно использовать результаты испытания.

Давно ясно, что «в первое время после приложения нагрузки приобретают возможность перемещения те частицы (и их агрегаты), в контактах которых с их соседями наиболее высокие деформирующие напряжения сочетаются с низкими размерами сцепления. Происходящие вначале некоторые перемещения отдельных частиц приводят к изменениям в распределении напряжений в контактах и их повышению в отдельных пунктах. Там, где деформирующие напряжения превысят сцепление, вновь появляется возможность перегруппировки частиц. Подобное вовлечение в движение все новых и новых групп частиц приводит к затягиванию деформаций во времени» [2]. Исследованиями ползучести глин показано, что при деформации микроструктуры «наряду с процессом «залечивания» дефектов происходят смещение частиц и их более плотная упаковка и упрочнение грунта» [3].

При длительных наблюдениях за сдвиговой ползучестью установлено, что «кривые ползучести не являются плавными кривыми... Перестройка структуры грунта происходит скачкообразно», с упрочнением грунта. На этапе формирования зоны скольжения «в отдельных участках массы грунта непрерывно происходит разрушение связей в контактах между частицами и местная перестройка структуры... В некоторые моменты времени, когда соседние участки оказываются уже достаточно перегруженными, процесс лавинообразно охватывает всю формирующуюся зону скольжения, и тогда происходят хорошо наблюдаемые скачки. К концу первого этапа возникает грубая поверхность скольжения с ориентированным вдоль нее расположением чешуйчатых частиц» [4].

Теория предельного состояния описывает поверхности скольжения феноменологически. Но она рассматривает финальный момент его работы под нагрузкой – момент разрушения. Благодаря строгой обоснованности и законченности она сыграла огромную положительную роль в развитии механики грунтов. Однако ее возможности ограничены в области используемых нагрузок на основание фундамента, потому что она не отражает развитие предельного состояния, по мере роста нагрузки с реальной скоростью [5].

Наблюдения за деформациями грунтов позволили выявить эффекты, которые не объясняются существующими теориями деформаций и разрушения: неравномерное увеличение осадки штампа [6], образование блоков, перемещающихся как целое внутри области предельного состояния, как в сыпучих грунтах [7, 8], так и в глинистых [5, 9], влияние неоднородности на структурные деформации грунта [1, 7].

Применяемая на практике стандартная методика [10] хороша тем, что используются штампы размеров, часто сравнимых с размерами фундаментов. Однако применение результатов к большим фундаментам, площадью десятки и сотни квадратных метров, необоснованно. Центральной

проблемой здесь являются условия подобия штампов и фундаментов, которые позволили бы обосновать моделирование работы последних.

Стандартная методика испытаний штампом

Стандартная методика предусматривает испытание статическими нагрузками, которые прикладываются «ступенями давления (на подошве штампа) с выдержкой их во времени до условной стабилизации осадки» [10]. Для вычисления модуля деформации строится график зависимости осадки от давления " $p - S$ ". Модуль деформации грунта вычисляется для прямолинейного участка графика.

Этот способ имеет следующие недостатки:

- для расчета модуля деформации используется линеаризованный участок графика " $p - S$ ", в то время как при проектировании основания используются значения давления за пределами этого участка;

- выбор начала линеаризованного участка связывается с природным давлением, хотя известно, что оно не влияет непосредственно на деформационные свойства грунта [2];

- для построения графика " $p - S$ " используются значения условно стабилизированной осадки, которая в действительности не завершена в той же степени, что и в основании фундамента, так как опыт со штампом проводится быстрее, чем нагружение основания при строительстве [2].

Методика непрерывного нагружения основания

Расчет осадки произведем на основе моделирования штампом работы основания фундамента [6].

Испытание штампом производится при постоянно возрастающем давлении на подошве и непрерывном измерении осадки. По достижении

заданного значения давления производят наблюдение за ползучестью оседания при постоянном давлении.

Пусть давление p на подошве штампа возрастает с постоянной скоростью B_{pl} , т. е.

$$p = B_{pl} t, \quad (1)$$

где t - время с начала нагружения.

Осадка штампа увеличивается неравномерно (Рисунок 1). Эта неравномерность хорошо иллюстрируется изменением скорости осадки: скорость осадки изменяется циклически (Рисунок 2):

$$du / dt = B_p du / dp, \quad (2)$$

где u - осадка штампа, измеряемая непрерывно с малым шагом регистрации значений, не более 0,005 мм.

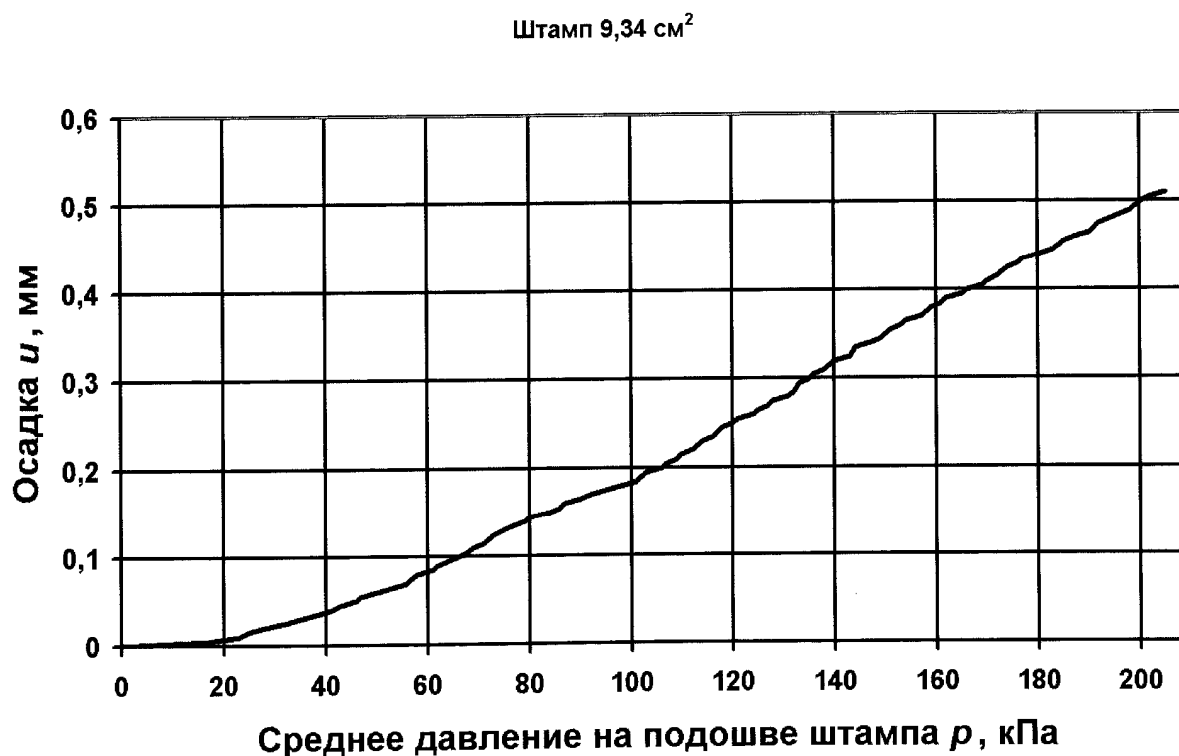


Рисунок 1 – Диаграмма осадки круглого штампа

Диаграмма функции (2) имеет циклическую форму, т. е. состоит из сменяющих друг друга циклов деформации, включающих нисходящую ветвь ($\partial u / \partial t < 0$) и восходящую ветвь ($\partial u / \partial t > 0$).

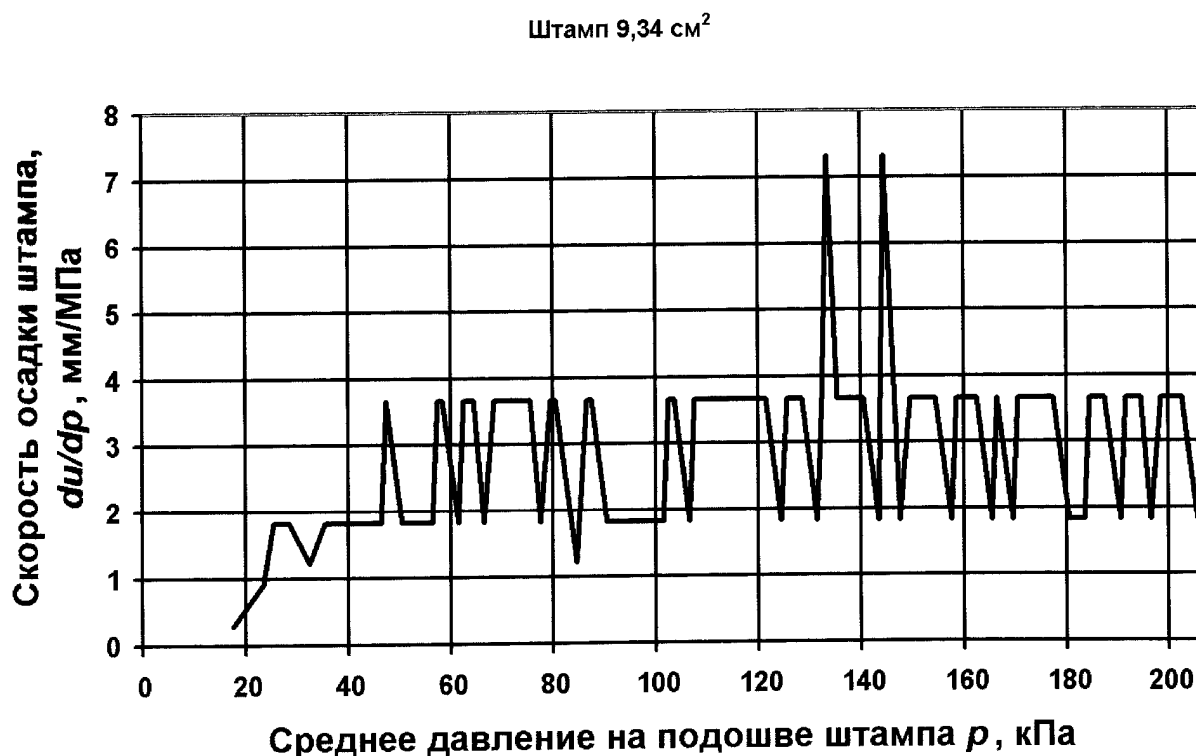


Рисунок 2 – Диаграмма скорости осадки круглого штампа при постоянной скорости увеличения давления 1,11 кПа/с

Каждый цикл состоит из нисходящей и восходящей ветвей. Обозначим длину нисходящей ветви через $\Delta p_{e,i}$, восходящей - $\Delta p_{r,i}$, длину цикла $\Delta p_i = \Delta p_{e,i} + \Delta p_{r,i}$ а приращения осадки штампа на соответствующих ветвях – через $\Delta s_{e,i}$ и $\Delta s_{r,i}$, где i - номер цикла, одинаковый для штампа и основания.

Вычисление приращений осадки фундамента и штампа

Примем, что нисходящая ветвь цикла, описывающая замедление деформации основания, отражает упругую деформацию скелета грунта под действием приращения давления $\Delta p_i = \Delta p_{e,i} + \Delta p_{r,i}$. Тогда осадка штампа

на нисходящей ветви в каждом цикле деформации может быть определена как для упругого полупространства по формуле Ф. Шлейхера:

$$\Delta s_{e.i} = \frac{(\Delta p_{e.i} + \Delta p_{r.i}) I_i D w (1 - m^2)}{C_e}, \quad (3)$$

где I_i - коэффициент, равный отношению площади опорной площадки уплотненной области грунта под штампом к площади штампа; D - диаметр штампа; w - коэффициент формы опорной площадки; m - коэффициент поперечной деформации грунта; C_e - модуль упругой деформации межчастичного контакта [11].

Коэффициент I_i зависит от формы уплотненной области грунта под штампом. Примем, что уплотненная область формируется поверхностями скольжения, составляющими слои клиньев скольжения. Под круглым штампом уплотненную область примем в форме усеченного конуса, большее основание которого представляет круг с диаметром D , а меньшее – круг с диаметром $(D - i2H_L / \sqrt{3})$, где iH_L - толщина слоя грунта под штампом, уплотненного поверхностями скольжения после i -го цикла деформации с начала нагружения штампа внешней нагрузкой. Под прямоугольным фундаментом уплотненная область представляет собой усеченную пирамиду, большее основание которой имеет размеры $B \times L$, а меньшее - $(B - i2H_L / \sqrt{3})(L - i2H_L / \sqrt{3})$.

Величины H_L и C_e являются микроструктурными характеристиками. Их значения определяются в опытах с грунтом основания по методике, описанной в [11].

На нисходящей ветви цикла увеличение внешней нагрузки воспринимается упругим сопротивлением межчастичных контактов:

$$\Delta p_{e.i}^{(pl)} A_{pl} = F_{b2} \Delta N_{e.i}^{(pl)}, \quad (4)$$

где F_{b2} - сила упругого сопротивления единичного контакта; $\Delta N_{e.i}^{(pl)}$ - число мобилизованных упругих контактов в основании штампа.

Примем в каждом цикле деформации основания фундамента приращение давления равным приращению давления, измеренному при испытании штампом. На нисходящей ветви цикла:

$$\Delta p_{e.i}^{(fn)} = \Delta p_{e.i}^{(pl)}. \quad (5)$$

Тогда получаем, при подстановке (4) в (5),

$$\frac{\Delta N_{e.i}^{(fn)}}{A_{fn}} = \frac{\Delta N_{e.i}^{(pl)}}{A_{pl}}, \quad (6)$$

где $\Delta N_{e.i}$ - число мобилизованных упругих контактов в основании штампа.

Восходящая ветвь отражает ползучесть клиньев скольжения уплотненной области по поверхностям скольжения в уплотненной области под штампом. Осадка штампа на восходящей ветви рассчитана с использованием параметров аппроксимации процесса ползучести основания штампа, наблюдаемого при постоянной силе вдавливания. Процесс ползучести удобнее регистрировать, приняв осадку за независимую переменную, поэтому представим длительность процесса как функцию осадки:

$$t_h = a_h \exp(b_h u_t), \quad (7)$$

где a_h и b_h - параметры аппроксимации.

Осадка штампа на восходящей ветви рассчитывается по формуле:

$$\Delta s_{r.i} = \Delta s_{e.i} \frac{\Delta p_{r.i}}{\Delta p_{e.i}} \left[\ln(\Delta t_h) - \ln(a_h) \right] \frac{1}{b_h}. \quad (8)$$

где $\Delta t_{r.i}^{(pl)} = \Delta p_{r.i}^{(pl)} / B_{pl}$, B_{pl} - скорость увеличения давления на подошве штампа в формуле (1).

Приращение давления на восходящей ветви уравнивается сопротивлением на поверхностях скольжения:

$$\Delta p_{r.i}^{(pl)} A_{pl} = \left[r_N (F_{b2} - F_3) + \frac{h v_{cr.i}^{(pl)}}{d} \right]^{(pl)} \Delta \Phi_i^{(pl)}, \quad (9)$$

где r_N - плотность активных контактов на поверхностях скольжения, F_3 - сила сопротивления отрыву глинистых поверхностей при дальней агрегации, h - коэффициент вязкости жидкости в микропоре, d - ширина микропоры – все суть микроструктурные характеристики модели деформации грунта [11]; $v_{cr.i}^{(pl)}$ - скорость вязкого скольжения: $v_{cr.i}^{(pl)} = \Delta s_{r.i}^{(pl)} / \Delta t_{r.i}^{(pl)}$; $\Delta \Phi_i^{(pl)}$ - приращение площади поверхностей скольжения.

Представим (9) в виде

$$\Delta p_{r.i}^{(pl)} A_{pl} = F_r \Delta N_{r.i}^{(pl)}, \quad (10)$$

где F_r - сила обобщенного сопротивления неупругого единичного контакта на поверхностях скольжения; $\Delta N_{r.i}^{(pl)}$ - приращение числа неупругих контактов.

Примем на восходящей ветви цикла условие равенства приращений давления штампа и фундамента:

$$\Delta p_{r.i}^{(fn)} = \Delta p_{r.i}^{(pl)}. \quad (11)$$

Тогда, если $v_{cr.i}^{(fn)} = v_{cr.i}^{(pl)}$, получаем, при подстановке (10) в (11),

$$\frac{\Delta N_{r.i}^{(fn)}}{A_{fn}} = \frac{\Delta N_{r.i}^{(pl)}}{A_{pl}}. \quad (12)$$

Критерий подобия основания фундамента и штампа

Предположим, что приращение площади поверхностей скольжения пропорционально опорной площади:

$$\text{штампа: } \Delta \Phi_i^{(pl)} = x_i^{(pl)} A_{pl}, \quad (13)$$

$$\text{фундамента: } \Delta \Phi_i^{(fn)} = x_i^{(fn)} A_{fn}, \quad (14)$$

где $x_i^{(pl)}$ и $x_i^{(fn)}$ - коэффициенты относительной плотности поверхностей скольжения в i -ом цикле деформации основания штампа и фундамента, соответственно.

Подстановкой (13) и (14) в (12) получаем

$$\frac{\Delta N_{r.i}^{(fn)}}{\Delta \Phi_i^{(fn)}} x_i^{(fn)} = \frac{\Delta N_{r.i}^{(pl)}}{\Delta \Phi_i^{(pl)}} x_i^{(pl)}. \quad (15)$$

При условии, что плотность поверхностей скольжения одинакова как для штампа, так и для фундамента,

$$x_i^{(fn)} = x_i^{(pl)} \quad (16)$$

получаем уравнение

$$\frac{\Delta N_{r.i}^{(fn)}}{\Delta \Phi_i^{(fn)}} = \frac{\Delta N_{r.i}^{(pl)}}{\Delta \Phi_i^{(pl)}}. \quad (17)$$

Уравнения (6) и (17) вместе с условием (16) составляют **критерий подобия основания фундамента и штампа** на этом же основании:

увеличение числа мобилизованных упругих контактов пропорционально площади фундамента;

увеличение числа мобилизованных неупругих контактов на единицу приращения площади поверхностей скольжения одинаково для основания фундамента и для штампа на том же основании.

Расчет осадки фундаментов непосредственно по результатам испытаний основания штампом

По результатам испытания штампом строится график функции (2), на нем выделяется участок $FD-1$ от начала нагружения до значения p_{nc} , при котором достигается первое максимальное значение $f_{\max.1}(p_{nc})$, участок $FD-2$ от p_{nc} до конечного значения давления p_{fn} . Определяется по графику (1) число циклов n_c на участке $FD-1$.

Конечное значение давления p_{fin} определяется в ходе опыта и соответствует второму максимуму $f_{\max,2}(p_{fin})$. При p_{fin} производится наблюдение за ползучестью (7).

Для циклов деформации с номерами $i = 1 \dots n_c$ рассчитывается приращение упругой осадки фундамента:

$$\Delta s_{e.i}^{(fn)} = \frac{B W^{(fn)}}{D W^{(pl)}} \frac{I_i^{(fn)}}{I_i^{(pl)}} \Delta s_{e.i}^{(pl)}, \quad (18)$$

где

$$\frac{I_i^{(fn)}}{I_i^{(pl)}} = \frac{(B - i2H_L/\sqrt{3})(L - i2H_L/\sqrt{3}) D^2}{(D - i2H_L/\sqrt{3})^2 BL}, \quad (19)$$

а значение H_L определяется из уравнения

$$H_L = \frac{D}{2n_c}. \quad (20)$$

Приращения давления на подошве фундамента принимаются равными приращениям давления на подошве штампа:

$$\Delta p_{e.i}^{(fn)} = \Delta p_{e.i}^{(pl)} I_i^{(fn)}, \quad (21)$$

$$\Delta p_{r.i}^{(fn)} = \Delta p_{r.i}^{(pl)} I_i^{(fn)} x_i^{(fn)}. \quad (22)$$

Неупругое приращение осадки фундамента рассчитывается по формуле (8):

$$\Delta s_{r.i}^{(fn)} = \Delta s_{e.i}^{(fn)} \frac{\Delta p_{r.i}^{(pl)}}{\Delta p_{e.i}^{(pl)}} \left[\text{Ln}(\Delta t_{r.i}^{(fn)}) - \text{Ln}(a_h) \right] \frac{\sqrt{x_i^{(fn)}}}{b_h}. \quad (23)$$

где $\Delta t_{r.i}^{(fn)} = \Delta p_{r.i}^{(fn)} / B_{fn}$, B_{fn} - скорость увеличения давления на подошве фундамента при возведении сооружения и передаче ему эксплуатационной нагрузки.

Расчет осадки фундамента производится по формуле

$$s^{(fn)} = s_e^{(fn)} + s_r^{(fn)}, \quad (24)$$

где $s_e^{(fn)} = \sum_{i=1}^k \Delta s_{e.i}^{(fn)}$ и $s_r^{(fn)} = \sum_{i=1}^k \Delta s_{r.i}^{(fn)}$, а $\Delta s_{e.i}^{(fn)}$ и $\Delta s_{r.i}^{(fn)}$ рассчитываются

по формулам (18) и (23).

Значения давления, соответствующие расчетным значениям осадки, определяются по формуле

$$p^{(fn)} = p_e^{(fn)} + p_r^{(fn)}, \quad (25)$$

где $p_e^{(fn)} = \sum_{i=1}^k \Delta p_{e.i}^{(fn)}$ и $p_r^{(fn)} = \sum_{i=1}^k \Delta p_{r.i}^{(fn)}$, а $\Delta p_{e.i}^{(fn)}$ и $\Delta p_{r.i}^{(fn)}$ задаются по

формулам (21) и (22).

Задавая последовательным рядом значений $i = 1 \dots k$, вычисляют соответствующие пары значений давления и осадки: от $(p_1^{(fn)}; s_1^{(fn)})$ до $(p_k^{(fn)}; s_k^{(fn)})$. Однако, этот ряд ограничен возможностями штампа: основание штампа имеет меньшую несущую способность, чем основание фундамента. Число рядов клиньев скольжения в основании фундамента больше, чем в основании штампа, поэтому рассчитать приращения осадки фундамента с прямым применением формулы (23) невозможно.

В этом случае, чтобы продолжить вычисление приращений осадки фундамента, необходимо вычислить коэффициенты $I_i^{(fn)}$ и $X_i^{(fn)}$ при $i > n_c$.

Расчет осадки фундаментов, площадь которых превышает площадь штампа

Вычисление коэффициента $I^{(fn)}$.

Рассчитаем значения $I^{(fn)}$ при $i = (n_c + 1) \dots 2n_c$ по формуле

$$I_i^{(fn)} = \frac{(B - (i - n_c)n_c 2H_L / \sqrt{3})(L - (i - n_c)n_c 2H_L / \sqrt{3})}{BL}. \quad (26)$$

Рассчитаем значения $I^{(fn)}$ при $i = (2n_c + 1) \dots 3n_c$ по формуле

$$I_i^{(fn)} = \frac{(B - (i - 2n_c)n_c^2 2H_L / \sqrt{3})(L - (i - 2n_c)n_c^2 2H_L / \sqrt{3})}{BL}. \quad (27)$$

и т. д. до

$$I_i^{(fn)} = 0. \quad (28)$$

Вычисление коэффициента $x^{(fn)}$.

Для вычисления коэффициента $x^{(fn)}$ необходимо использовать данные о ползучести грунта, полученные в опыте при наблюдении за осадкой штампа при постоянном давлении на его подошве p_{fin} . Как следует из (7), скорость ползучести $du_i / dt = 1/b_h t$. Определим микроструктурную характеристику h/d в формуле (9), используя ее связь с касательным напряжением на поверхности скольжения и скоростью ползучести в начальный момент $t = a_h$ через закон движения вязкой жидкости И. Ньютона:

$$\frac{h}{d} = \frac{p_{fin} b_h a_h}{\sqrt{3}}. \quad (29)$$

Применим формулу (9) с учетом (13) к 1-ому и 2-ому циклам деформации основания штампа, положив $x_1^{(pl)} = 1$:

$$\Delta p_{r.1}^{(pl)} - \frac{h}{d} v_{cr.1}^{(pl)} = \frac{\Delta p_{r.2}^{(pl)}}{x_2} - \frac{h}{d} v_{cr.2}^{(pl)}, \quad (30)$$

откуда получаем формулу для вычисления коэффициента $x_2^{(pl)}$:

$$x_2^{(pl)} = \frac{\Delta p_{r.2}^{(pl)}}{\Delta p_{r.1}^{(pl)} + \frac{h}{d} (v_{cr.2}^{(pl)} - v_{cr.1}^{(pl)})}. \quad (31)$$

Аналогично вычисляем остальные коэффициенты при $i = 3 \dots n_c$:

$$x_i^{(pl)} = \frac{\Delta p_{r,i}^{(pl)}}{\Delta p_{r,1}^{(pl)} + \frac{h}{d}(v_{cr,i}^{(pl)} - v_{cr,1}^{(pl)})}. \quad (32)$$

Коэффициенты $x_1^{(pl)} \dots x_{nc}^{(pl)}$ используются, согласно (16), как $x_1^{(fn)} \dots x_{nc}^{(fn)}$, и во всех диапазонах значений $i: i = 1 \dots n_c; i = (n_c + 1) \dots 2n_c; i = (2n_c + 1) \dots 3n_c$ и т. д.

Рассчитывается неупругое приращение осадки фундамента:

при $i = (n_c + 1) \dots 2n_c$

$$\Delta s_{r,i}^{(fn)} = \Delta s_{e,i}^{(fn)} \frac{\Delta p_{r,i}^{(pl)}}{\Delta p_{e,i}^{(pl)}} [Ln(\Delta t_h) - Ln(a_h)] \frac{1}{b_h} \left[\left(\sum_{m=1}^{nc} x_m \right)^{0.5} + \left(\sum_{k=1}^{i-nc} x_k \right)^{0.5} \right]; \quad (33)$$

при $i = (2n_c + 1) \dots 3n_c$

$$\Delta s_{r,i}^{(fn)} = \Delta s_{e,i}^{(fn)} \frac{\Delta p_{r,i}^{(pl)}}{\Delta p_{e,i}^{(pl)}} [Ln(\Delta t_h) - Ln(a_h)] \frac{1}{b_h} \left[\left(2 \sum_{m=1}^{nc} x_m \right)^{0.5} \pm \left(\sum_{k=1}^{i-2nc} x_k \right)^{0.5} \right]; \quad (34)$$

В формуле (34) принимается знак (-); но если какое-либо значение $\Delta s_{r,i}^{(fn)} < 0$, то вместо знака (-) ставится знак (+), и расчет продолжается при $i = (3n_c + 1) \dots 4n_c$ по формуле

$$\Delta s_{r,i}^{(fn)} = \Delta s_{e,i}^{(fn)} \frac{\Delta p_{r,i}^{(pl)}}{\Delta p_{e,i}^{(pl)}} [Ln(\Delta t_h) - Ln(a_h)] \frac{1}{b_h} \left[\left(3 \sum_{m=1}^{nc} x_m \right)^{0.5} \pm \left(\sum_{k=1}^{i-3nc} x_k \right)^{0.5} \right]. \quad (35)$$

Вышеприведенное рассуждение о знаках в формуле (34) повторяется применительно к формуле (35).

Если результат расчета по формуле (34) при знаке (-) $\Delta s_{r,i}^{(fn)} > 0$, то расчет продолжается при $i = (3n_c + 1) \dots 4n_c$ по формуле

$$\Delta s_{r.i}^{(fn)} = \Delta s_{e.i}^{(fn)} \frac{\Delta p_{r.i}^{(pl)}}{\Delta p_{e.i}^{(pl)}} \left[\text{Ln}(\Delta t_h) - \text{Ln}(a_h) \right] \frac{1}{b_h} \left[\left(2 \sum_{m=1}^{nc} x_m \right)^{0.5} - 2 \left(\sum_{k=1}^{i-3nc} x_k \right)^{0.5} \right]. \quad (36)$$

В формуле (33) аналогично:

$$\Delta p_{e.nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{e.1}^{(pl)}; \Delta p_{e.nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{e.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{e.2nc}^{(pl)} = \Delta p_{e.nc}^{(pl)},$$

$$\Delta p_{r.nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{r.1}^{(pl)}; \Delta p_{r.nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{r.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{r.2nc}^{(pl)} = \Delta p_{r.nc}^{(pl)}.$$

В формуле (34) аналогично:

$$\Delta p_{e.2nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{e.1}^{(pl)}; \Delta p_{e.2nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{e.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{e.3nc}^{(pl)} = \Delta p_{e.nc}^{(pl)},$$

$$\Delta p_{r.2nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{r.1}^{(pl)}; \Delta p_{r.2nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{r.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{r.3nc}^{(pl)} = \Delta p_{r.nc}^{(pl)}.$$

В формулах (35) и (36) аналогично:

$$\Delta p_{e.3nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{e.1}^{(pl)}; \Delta p_{e.3nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{e.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{e.4nc}^{(pl)} = \Delta p_{e.nc}^{(pl)},$$

$$\Delta p_{r.3nc+1}^{(pl)} = \Delta p_{r.1}^{(pl)}; \Delta p_{r.3nc+2}^{(pl)} = \Delta p_{r.2}^{(pl)}; \dots; \Delta p_{r.4nc}^{(pl)} = \Delta p_{r.nc}^{(pl)},$$

и т. д., т. е. набор приращений давления в фазе $FD-1$ используется периодически в последующих фазах деформации.

Расчеты осадки производят до заданного значения, но не далее выполнения условия (28). Полученные пары значений $(p_1^{(fn)}; s_1^{(fn)}) \dots (p_k^{(fn)}; s_k^{(fn)})$ используют для анализа возможностей основания фундамента.

Определение характерных значений сопротивления основания фундамента

Условие (28) соответствует полному переходу основания в предельное состояние, так как оно выражает нулевую площадь нижнего основания уплотненной области грунта под фундаментом. Вычисленное при нем значение давления дает несущую способность основания фундамента F_u (Рисунок 3).

Допустимое давление, как и расчетное сопротивление, должно быть определено как безопасное эксплуатационное давление на основании. Его можно установить, проанализировав скорость роста осадки при увеличении давления на подошве фундамента. Скорость достигает максимума при некотором значении давления, затем уменьшается, в целом, перед исчерпанием несущей способности. Последнее характеризуется резким увеличением скорости деформации. Следовательно, за допустимое давление p_{cal} следует принять значение, соответствующее малым значениям скорости деформации. На Рисунке 4 за p_{cal} принято значение предпоследнего минимума скорости деформации.

Расчет осадки фундаментов с площадью подошвы 324 м²

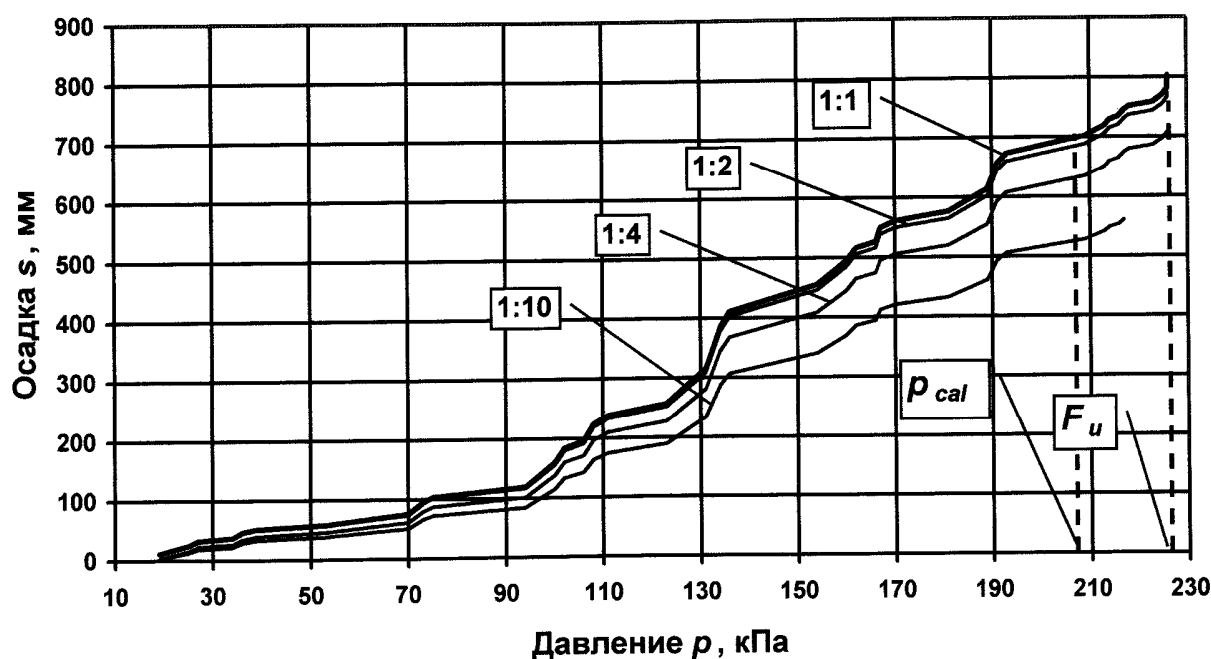


Рисунок 3 – Вычисленные диаграммы осадок прямоугольных фундаментов с разным отношением сторон В:L при нагружении основания со скоростью 5,56 кПа/сут.

Таким образом, предлагаемая нами методика расчета позволяет построить $Diag \{ p^{(fn)}; s^{(fn)} \}$ во всем диапазоне давлений от нуля до исчерпа-

ния несущей способности. На этом графике можно определить либо давление на подошве фундамента, соответствующее предельному значению осадки для сооружения, либо осадку основания, соответствующую допустимому давлению.

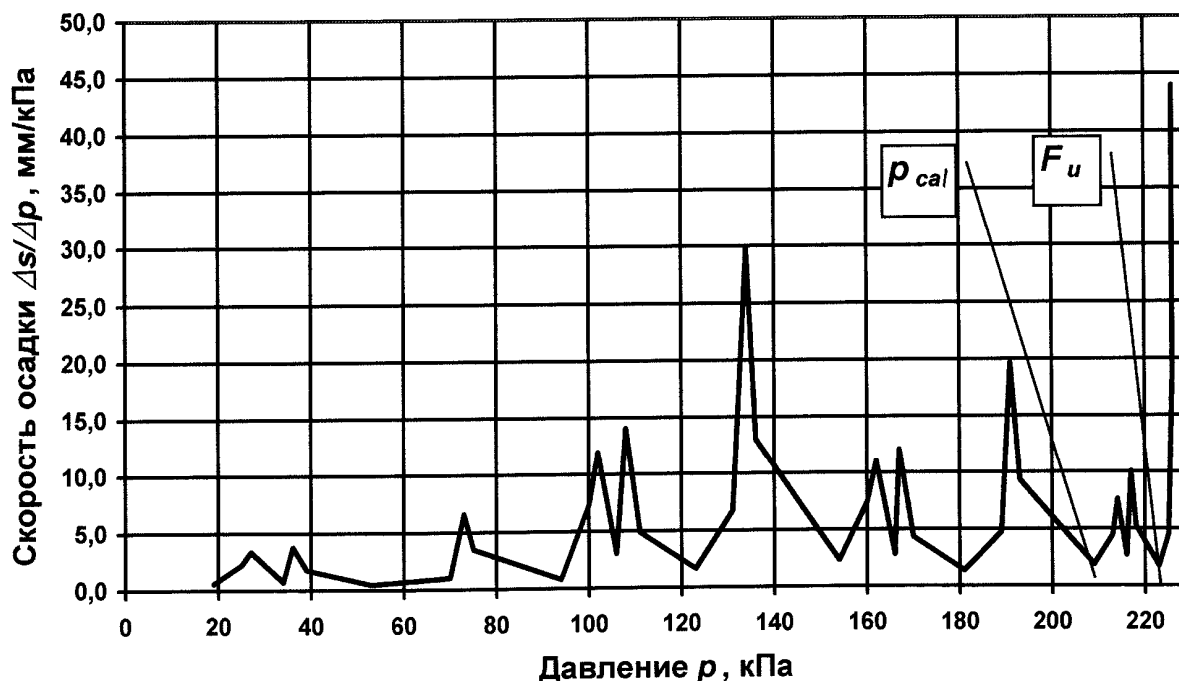


Рисунок 4 – Скорость вычисленной осадки фундамента с площадью подошвы 324 м^2 и с отношением сторон 1:1

В приведенном примере вычислены значения p_{cal} и F_u для фундамента одной площади, но с разными значениями отношения сторон (Таблица). Получены значения допустимого давления p_{cal} , несущей способности F_u , модуля общей деформации E_o и коэффициента постели k_s . Все они мало отличаются от результатов испытания штампом. Значения допустимого давления больше значений расчетного сопротивления, вычисленного условия ограничения размеров областей предельного состояния грунта под краями фундамента [1].

Значения коэффициента постели k_s для фундаментов дали большой разброс и сильно отличаются от значения для штампа.

Таблица – Характерные показатели основания фундаментов,
полученные расчетом

	Допустимое давление	Уплотненная область, в % к диаметру (ширине)	Несущая способность	Уплотненная область, в % к диаметру (ширине)	Модуль деформации	Коэффициент постели
	p_{cal}	H_p/B	F_u	H_p/B	E_o	k_s
	кПа	%	кПа	%	МПа	МН/м ³
Штамп 0,000934 м ²	134,0	45	202	500	8,5	558
Фундаменты 324 м ² :						
b/l = 1:1	209,1	58	226,7	255	11,2	0,85
b/l = 1:2	212,3	82	217,4	180	10,1	0,86
b/l = 1:4	202,3	46	207,8	232	10,2	1,13
b/l = 1:10	176,6	27	196,9	220	10,2	1,35
Среднее	200,1		212,2		10,4	1,0
К. вариации	0,002		0,06		0,05	0,23

Размеры уплотненных областей, как показал расчет, при допустимом давлении могут быть больше четверти ширины фундамента, потому что при этой методике расчета они лучше контролируются. Они достигают 2,5 ширины фундамента при исчерпании несущей способности.

Использованные источники

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. Краткий курс. – М.: ВШ, 1983. – 273 с.
2. Денисов Н.Я. Некоторые особенности деформаций глинистых пород//В кн.: Природа прочности и деформаций грунтов, М.: Стройиздат, 1972, с. 85-89.
3. Кинетика структурных деформаций и разрушения глин/ Вялов С.С., Зарецкий Ю.К., Максимьяк Р.В., Пекарская Н.К. – В кн.: Труды к Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению, М.: Стройиздат, 1973, с. 13-23
4. Исследование ползучести глинистых грунтов при сдвиге/ Тер-Степанян Г.И., Месчан С.Р., Галстян Р.Р. - В кн.: Труды к Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментостроению, М.: Стройиздат, 1973, с. 51-63.
5. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2. - М.: Мир, 1969. - 863 с.
6. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Расчет осадки основания фундамента по микроструктурной модели грунта//Развитие городов и геотехническое строительство. Труды Международной конф. по геотехнике. Т. 3, СПб, 2008, с. 193-197.
7. Kozinski, J., Donze, F.V. (2008) YADE-OPEN DEM: an open-source software using a discrete element method to simulate granular material, 19 p.
8. Дрешер А., Де Йоселен де Йонг Ж. Проверка механической модели течения гранулированного материала методами фотоупругости. - В кн.: Определяющие законы механики грунтов, М.: Мир, 1975, с. 144-165.

9. Reches, Z., 1986, Networks of shear faults in the field and in experiments, *Fragm., Form and Flow Tract. Media, Proc. F³-Conf.*

10. ГОСТ 12374-77 Грунты. Метод полевого испытания статическими нагрузками.

11. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца//Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс], № 45(1), 2009. <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.