

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ И ШИРИНЫ ПОДОШВЫ ФУНДАМЕНТА НА ЕГО ОСАДКУ

П. С. Пойта¹, Т. П. Шалобыта², А. А. Четырбок³

¹*Д.т.н., профессор кафедры геотехники и транспортных коммуникаций
УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : ppsbrest@mail.ru*

²*К.т.н., доцент кафедры технологии бетона и строительных материалов
УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : t_shalobyta@mail.ru*

³*Студентка УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : chebrtok@gmail.com*

Реферат

Проведены исследования влияния различных факторов: глубины заложения, размеров, формы фундамента на напряженно-деформированное состояние грунтового основания и величину его осадки. Выявлены особенности деформирования грунта в случае его работы во второй фазе, т.е. при развитии пластических деформаций. Предложен метод определения размеров фундамента различной формы, имеющих одинаковую осадку.

Ключевые слова: основание фундаментов, несущая способность грунта, напряженно-деформированное состояние, форма фундамента, осадка, фазы деформирования, коэффициент отношения сторон, глубина заложения фундамента.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE DEPTH OF LAYING AND THE WIDTH OF THE SOLE OF THE FOUNDATION ON ITS SETTLEMENT

P. S. Poita, T. P. Shalobyta, A. A. Chetyrbok

Abstract

The influence of various factors has been studied: the depth of the foundation, its size and shape on the stress-strain state of the soil basement and the amount of its precipitation. The features of soil deformation in the case of its operation in the second phase, i.e. with the development of plastic deformations, are revealed. A method for determining the size of foundations of various shapes having the same draft is proposed.

Keywords: foundation base, soil bearing capacity, stress-strain state, foundation shape, settlement, deformation phases, aspect ratio, foundation depth.

Введение

Выбор глубины заложения подошвы фундаментов – одна из важнейших задач, влияющих на принятие наиболее рационального решения в комплексной взаимосвязи факторов, подлежащих учету при проектировании. Обычно, чем выше

расположена подошва, меньше ее ширина, тем меньше стоимость работ по устройству фундаментов. Поэтому при проектировании фундаментов стремятся принимать как можно меньшую глубину заложения и ширину его подошвы. Однако довольно часто слои грунта, расположенные ближе к поверхности, не соответствуют требованиям, предъявляемым к грунтам основания, так как они:

- обладают большой сжимаемостью и малой несущей способностью;
- периодически меняют свои первоначальные свойства (плотность, прочность и др.) под влиянием внешних факторов.

В связи с этим основная задача при выборе глубины заложения подошвы фундаментов состоит в выборе несущего слоя грунта, который совместно с нижерасположенными слоями обеспечивал бы при воздействии давлений развитие осадок в пределах допустимых значений.

Влияние глубины заложения подошвы фундамента на его осадку изучалось многими исследователями [1-4]. Однако в большинстве случаев опыты проводились, в основном, на моделях. Широких исследований с натурными фундаментами, в которых, при прочих равных условиях, обеспечивалась бы возможность изменения их глубины заложения d и относительного заглубления d/b (b – ширина или диаметр фундамента) нет.

По результатам имеющихся экспериментальных исследований установлено существенное влияние на осадку фундамента пригрузки – слоя грунта, расположенного по обе стороны от фундамента выше его подошвы. Увеличение давления от пригрузки способствует уменьшению осадки в сравнении с фундаментами, имеющими меньшую глубину заложения подошвы. Однако характер зависимости осадки от глубины заложения подошвы фундамента, или от его относительного заглубления, четко не установлен, так как опубликованные результаты исследований не вполне согласуются друг с другом.

Методы и результаты исследований

На практике чаще всего, используют две группы методов расчета осадок оснований:

- основанные на строгих решениях;
- приближенные, включающие дополнительные предположения, упрощающие расчеты.

Используя строгие решения о распределении напряжений в изотропном массиве грунта, выражение для определения осадки жесткого фундамента будет иметь вид:

$$S = \omega P b (1 - \mu^2) / E, \quad (1)$$

где ω – коэффициент, зависящий от формы и жесткости фундамента, но обычно принимаемый равным 0,8;

E , μ – соответственно модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта основания;

P – давление на основание;

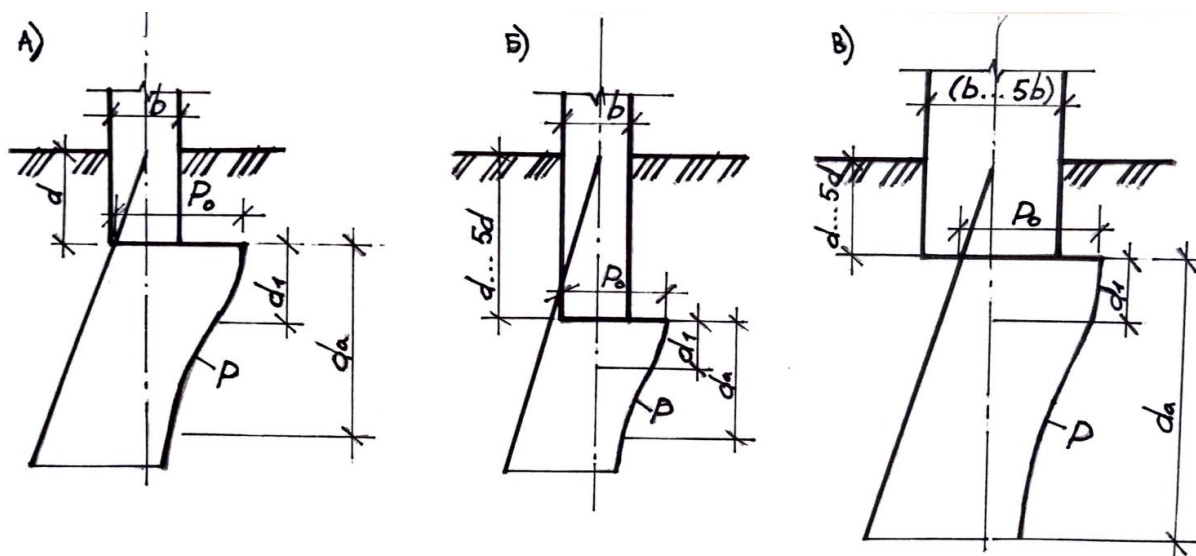
b – ширина фундамента.

Недостаток этого решения заключается в том, что оно применимо только для однородного напластования грунтов на значительную глубину ниже подошвы фундамента, что для практики не очень характерно. Кроме того, в расчетной за-

висимости не учитывается изменение природного напряженного состояния грунтов с глубиной, поэтому при значительных размерах фундаментов расчеты по формуле (1) дают завышенные значения осадок, т.е. приведенное решение может быть использовано для определения осадок фундаментов небольших размеров на однородных основаниях.

Вторая группа методов, включающая дополнительные, упрощающие расчет предпосылки, обладает большей универсальностью, чем строгие решения, и в связи с этим, обычно используется в практических расчетах. Расчетные модели, учитывающие реальную глубину заложения подошвы фундамента, не дают серьезных преимуществ перед приближенными моделями, в которых фундамент располагается на поверхности, а влияние заглубления учитывается снижением среднего давления P под подошвой на величину природного напряжения $\sigma_{zq,0}$. Поэтому условно принято считать, что при $P \leq \sigma_{zq,0}$ дополнительного уплотнения не происходит и, следовательно, осадки вычисляются по дополнительному давлению $P_0 = P - \sigma_{zq,0}$. Изложенное выше относится к фундаментам сравнительно небольших размеров ($b < 10,0$ м).

Учитывая это, нами выполнены расчеты осадки фундаментов одинаковой ширины (квадратных, прямоугольных, ленточных), подошва которых расположена на однородном по глубине и слоистом основании, модуль деформации которых менялся от 10,0 до 30,0 МПа, глубина заложения менялась от 1,0 до 6,0 метров, а ширина – от 1,0 до 5,0 м (рис.1).



- А) фундамент шириной b и глубиной d ;
 Б) фундамент шириной b и глубиной $d...5d$;
 В) фундамент шириной $b...5b$ и глубиной $d...5d$.

Рисунок 1 – Схемы фундаментов и возможные эпюры напряжений, принятые в расчетах

На рис. 2 приведены результаты расчетов для фундаментов, имеющих различную ширину и различную глубину заложения их подошвы. Следует отметить, что для всех рассмотренных вариантов прямоугольных фундаментов коэффициент отношения сторон $\eta = l/b$ (l – длина, м, b – ширина, м) изменялся от 1,4 до 3,2.

Расчеты выполнены для дополнительных давлений на уровне подошвы фундаментов равном 100 кПа и 300 кПа.

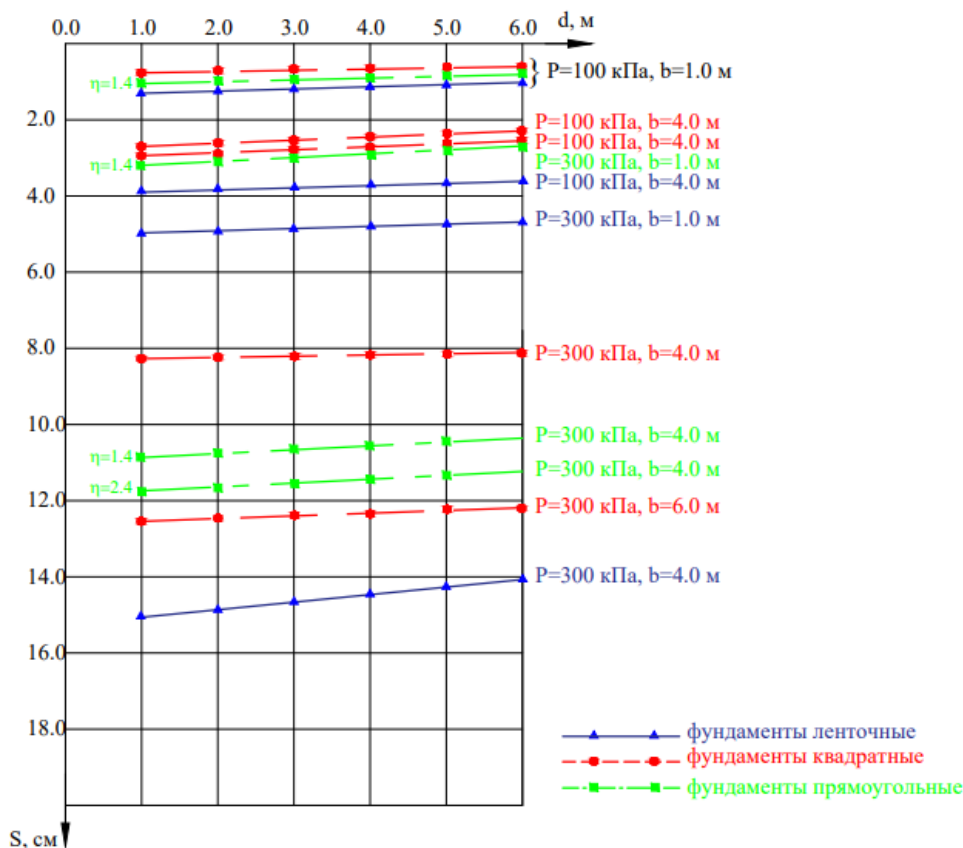


Рисунок 2 – Графики $s=f(d)$ для различных фундаментов

Анализ полученных результатов показал, что влияние глубины заложения фундаментов на их осадку в указанных диапазонах изменения d и b весьма незначительно. При прочих равных условиях наибольшую осадку имеют ленточные фундаменты. При ширине ленты 1,0 м и давлении 100 кПа наибольшая осадка у фундаментов при $d=1,0$ м. С ростом глубины заложения до 6,0 м она уменьшается на 30,8%. У квадратных фундаментов осадки самые наименьшие в сравнении с ленточными и прямоугольными. Уменьшение осадки в пределах изменения d от 1,0 м до 6,0 м составляет 14,2%. Для прямоугольных фундаментов на величину s оказывает влияние и коэффициент отношения сторон. Осадки всех прямоугольных фундаментов для любой глубины заложения подошвы находятся между значениями s для квадратных и ленточных фундаментов. При меньшем значении коэффициента η зависимость $s=f(d)$ ближе расположена к аналогичной зависимости, характерной для квадратных фундаментов. При увеличении коэффициента η величины осадок во всем диапазоне изменения d приближаются к осадкам ленточных фундаментов, работающих в идентичных условиях. Отсюда очевидно, что на осадку фундамента при прочих одинаковых условиях (площади, ширине, глубине заложения, инженерно-геологических условиях и др.) определенное влияние оказывает и его форма. Изменив ширину ленточного фундамента до 4,0 м, мы получили довольно значительный рост осадки во всем интервале изменения d . При $d=1,0$ м увеличение ширины фундамента в четыре раза привело

к росту осадки в 2,92 раза. Здесь тенденция замедления роста осадки с увеличением d также сохраняется. При $d=6,0$ м различие в осадке составило 2,95 раза. При ширине фундамента 4,0 м и $d=1,0$ м осадка составила 3,8 см, а при $d=6,0$ м – $s=3,2$ см. Уменьшение осадки составило 15,8%. Как и в случае с шириной фундамента 1,0 м, рассмотренном выше, осадка фундамента квадратной формы со стороной 4,0 м во всем интервале изменения d меньшая, чем любой другой прямоугольной формы.

Большое влияние на величину осадки оказывает дополнительное давление. При увеличении дополнительного давления в три раза осадка ленточного фундамента при $b=2,0$ м и $d=1,0$ м возрастает в 2,64 раза. Если $d=6,0$ м, то рост осадки составляет почти 3,7 раза. Так, при $b=4,0$ м и $P=200$ кПа абсолютная осадка ленточного фундамента не превышает 4,0 см. При увеличении P до 300 кПа абсолютная осадка возрастает до 15,0 см, что для ряда сооружений она превышает предельно допустимую. Осадка квадратного фундамента такой же ширины равна 8,4 см, что меньше в 1,78 раза. Это означает, что наиболее решающим фактором в увеличении осадки фундаментов является дополнительное давление, или, действующая нагрузка.

Вторым, весьма значимым фактором, влияющим на выбор оптимальной конструкции фундамента, является ширина его подошвы. У ленточных фундаментов изменение ширины b с 1,0 м до 6,0 м при $P=100$ кПа и $d=1,0$ м увеличивает осадку в 3,6 раза. Увеличение глубины заложения до 4,0 м в целом уменьшает осадку при росте d в среднем на 8%.

Сравнение осадок ленточных фундаментов при $P=300$ кПа, одинаковом d , но при разной ширине, показывает, что увеличение ширины фундамента в 4 раза привело к росту осадки в 3,12 раза. При $d=6,0$ м это различие составило 3,39 раза. Осадка квадратного фундамента при $b=4,0$ м, в сравнении с прямоугольными, с различными значениями коэффициента η наименьшая, хотя рост осадки составил от 3,23 до 3,63 во всем диапазоне изменения d . Изменение осадки прямоугольных фундаментов зависит также и от коэффициента отношения сторон.

Таким образом, выполненный анализ показал, что увеличением глубины заложения фундамента при постоянных ширине и дополнительном давлении, можно достичь снижения осадки фундамента до 30%, что не столь существенно. Весьма важным фактором в регулировании осадок является форма фундамента. Более оптимальная – квадратная форма. Наибольшие осадки дают ленточные фундаменты. Фундаменты прямоугольной формы занимают промежуточное значение между ленточными и квадратными. Увеличение дополнительного давления и ширины фундамента влечет за собой резкий рост абсолютных осадок.

Еще раз подчеркнем, что сказанное выше относится к фундаментам, имеющим ширину менее 10,0 м. Следует отметить, что во всех рассмотренных выше случаях определение S производили при выполнении условия $P \leq R$, где R – расчетное сопротивление грунта. Однако, как показывают опытные данные, расчетные осадки во многих случаях меньше фактических, полученных экспериментально [3, 5-7].

Учитывая вышесказанное, вполне очевиден вопрос: за счет каких факторов, присутствующих при уплотнении грунта основания развивается осадка фундамента? Как отмечает Гольдштейн М.Н. и другие [5, 7] в общей осадке фундамента при рассмотрении влияния его размеров и нагрузки в одних случаях решающую роль играет ее составляющая за счет уплотнения грунта основания (первая фаза деформации), а в других – поперечные смещения частиц грунта (вторая фаза деформации).

Исходя из предположения, что до наступления второй фазы основание испытывает только уплотнение и в нем не возникают области предельного равновесия. Величина соответствующего давления была получена Н. П. Пузыревским [5].

$$P_{кр} = \frac{\pi}{ctg\varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} (\gamma d + c \cdot ctg\varphi) + \gamma d \quad (2)$$

где γ – удельный вес грунта,

c – сцепление,

φ – угол внутреннего трения.

С увеличением нагрузки на фундамент ($P > P_{кр}$) пластические деформации под краями фундамента растут, захватывая все большие объемы грунта и вызывая нарастание осадки. Тогда полная конечная осадка S фундамента может быть выражена в виде суммы двух составляющих

$$S = S_B + S_\delta \quad (3)$$

где S_B – составляющая конечной осадки, пропорциональная давлению на основание;

S_δ – нелинейная составляющая осадки, то есть за пределами линейного участка графика осадки.

Величина пластических зон, возникающих под краями фундамента, очевидно, зависит от его глубины заложения, размеров, жесткости. Увеличение глубины заложения способствует уменьшению размеров зон пластических деформаций, их влияние на осадку уменьшается. Увеличение ширины фундамента также вызывает уменьшение влияния пластических зон на его осадку. Из решений теории упругости известно, что под краями жесткого фундамента имеют место бесконечно большие давления, передаваемые на грунт. Если нет пригрузки, то под краями фундамента образуются зоны пластических деформаций даже при малых нагрузках. Однако, если $P < P_{кр}$, то влияние пластических зон, возникающих под жестким фундаментом, практически не отражается на величине осадки.

Расчеты деформаций с учетом нелинейной составляющей S_δ при условии $P_{кр} < P \leq R$ выполняли по методике [5].

Осадку фундамента за счет поперечных деформаций грунта S_δ равна

$$S_\delta = \frac{2\beta}{gE} [(P - \gamma d) aB - D] C \quad (4)$$

где

$$\beta = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}; \quad g = 1 - \frac{1}{n} + \xi; \quad B = \frac{A}{\alpha_1} \left[1 - \exp \left\{ -\alpha_1 \frac{z_y}{a} \right\} \right];$$

$$D = z_y \left[\gamma \left(d + \frac{z_y}{2} \right) + \sigma'_n \right]; \quad C = \left(\frac{\rho_0}{a} \right)^g - 1; \quad \xi = tg^2 \left(45 - \frac{\varphi_l}{2} \right).$$

α_1 и A – экспериментальные параметры, равные: $\alpha_1=1,4$, $A=0,5$ (для песков и супесей);

z_y – максимальная глубина компрессионной зоны;

$n=2,0$ – для песков и супесей;

a – полуширина фундамента;

σ_n' – максимальное уплотняющее давление (для обычно уплотненных грунтов $\sigma_n'=0$);

ρ_0 – зона бокового уплотнения грунта;

φ_I – расчетное значение угла внутреннего трения грунта.

Полученные результаты показали значительные различия в величине общей осадки фундамента. И чем больше давление, тем общая осадка возрастает больше. Наличие пригрузки уменьшает величину S . И чем больше глубина заложения, тем осадка фундамента меньше.

Следовательно, наличие слоя грунта, расположенного с разных сторон фундамента выше его подошвы (пригрузка), способствует улучшению его взаимодействия с основанием по сравнению с фундаментом, имеющим меньшую глубину заложения, тем более с фундаментом, расположенным на поверхности.

В работе [5] рекомендуется для оценки влияния размеров фундамента на его осадку использовать отношения периметра фундамента U к его площади A .

Более того, Гольдштейн М.Н. [5] и другие [6, 7] отмечают, что при небольших размерах фундамента ($b \leq 0,5$ м) увеличение размеров (площади) фундамента приводит к уменьшению отношения периметра фундамента к его площади (U/A). Благодаря этому уменьшается возможность бокового вытеснения грунта из-под фундамента, что в свою очередь, приводит к уменьшению величины осадки. Учитывая это, нами построены графики $S=f(U/A)$ для фундаментов, имеющих ширину от 1,0 м до 6,0 м при глубине заложения $d=1,0 \dots 4,0$ м при величине давления по подошве $P=100$ кПа и 300 кПа (рис. 3-6).

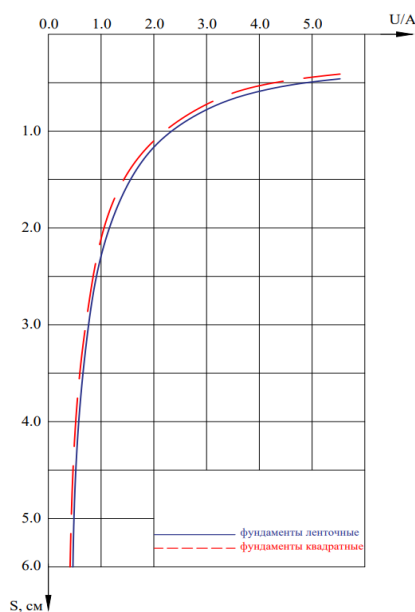


Рисунок 3 – График зависимости $s=f(U/A)$ при $P=100$ кПа, $d=1,0$ м

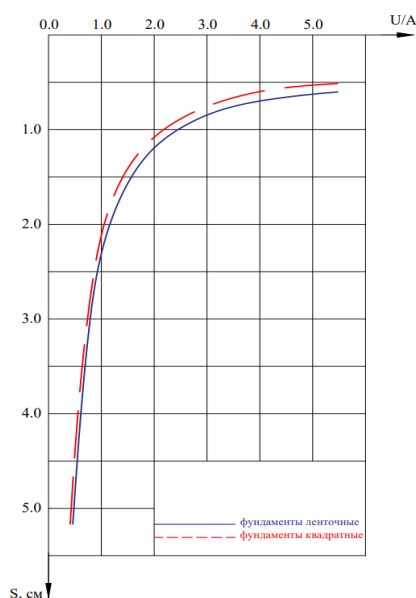


Рисунок 4 – График зависимости $s=f(U/A)$ при $P=100$ кПа, $d=4,0$ м.

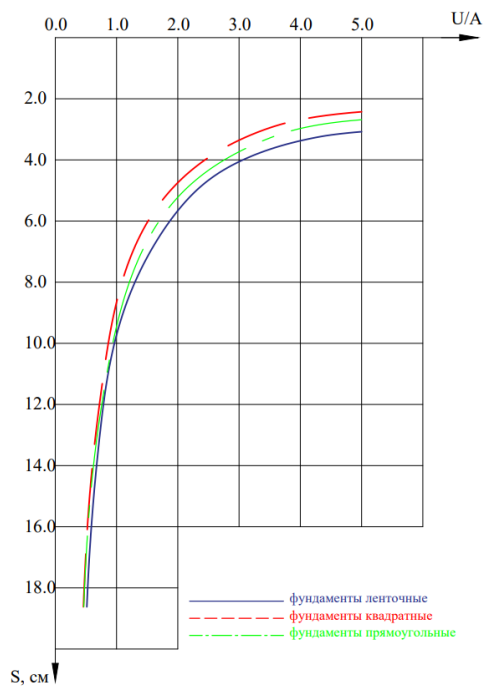


Рисунок 5 – График зависимости $s=f(U/A)$ при $P=300$ кПа, $d=1,0$ м.

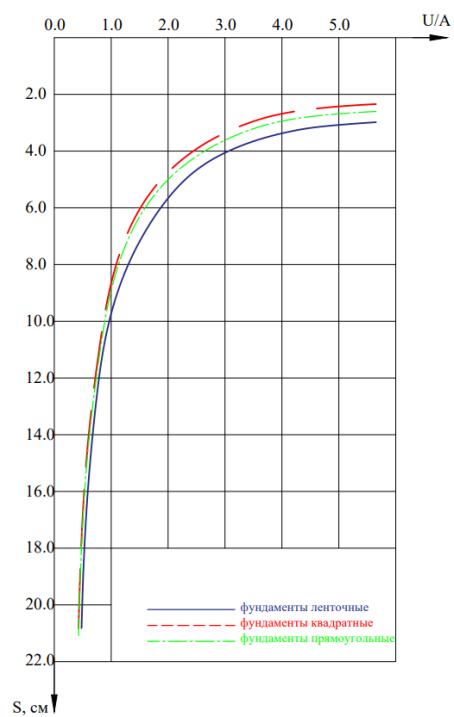
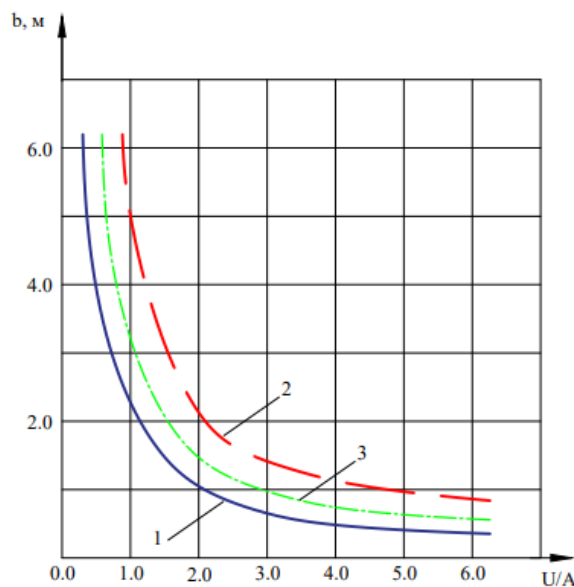


Рисунок 6 – График зависимости $s=f(U/A)$ при $P=300$ кПа, $d=4,0$ м.



1 - ленточные фундаменты; 2 - квадратные фундаменты; 3 - прямоугольные фундаменты

Рисунок 7 – Изменение ширины фундамента от отношения U/A

Во всех рассмотренных случаях, осадка фундамента при увеличении отношения U/A уменьшается. При глубине заложения фундамента $d=1,0$ м различие полученных значений S на участке изменения $U/A \geq 2,0$ (рис. 3) несколько больше, чем при глубине заложения $d=4,0$ м (рис. 4). Если $U/A < 2$ этот разброс практически отсутствует, однако с уменьшением отношения U/A осадка увеличивается весьма значительно. При этом, у фундамента с глубиной заложения $d=4,0$ м и $P=100$ кПа осадка при $U/A=1,0$ в 1,05 раза меньше, чем для идентичного фундамента с глубиной заложения $d=1,0$ м.

Следующей особенностью полученных зависимостей $S=f(U/A)$ является то, что при любой глубине заложения осадка ленточного фундамента имеет большее значение, а квадратного – меньшее при одном и том же значении U/A . Осадка прямоугольных фундаментов при любом значении коэффициента отношения сторон всегда имеет промежуточную величину. Определение значений U/A для фундаментов, имеющих ширину до 0,5 м, подтверждает утверждение, высказанное в работе [5], что увеличение размеров фундамента приводит к уменьшению отношения U/A . Действительно, увеличение размеров фундамента уменьшает отношение U/A . Однако, уменьшение отношения U/A , влечет за собой увеличение осадки. Этот факт может быть объяснен наличием выпора грунта из-под фундамента даже и при незначительных нагрузках. В связи с этим, проектирование фундаментов с размерами в плане до 0,5 м всегда будет связано со значительным ростом их осадки.

Увеличение давления по подошве фундаментов дает аналогичную картину изменения $S=f(U/A)$. Однако, при значении $P=300$ кПа и $d=1,0$ м разброс значений осадки несколько больший (рис. 5 и 6), чем при $P=100$ кПа. Имеет место рост осадки различных типов фундаментов. Осадка в среднем при $U/A=1,0$ с ростом давления возросла в 3.83 раза. Увеличение глубины заложения до 4,0 м уменьшает это различие до 1,2 раз. Разброс значений осадок разных типов фундаментов при $d=1,0$ м имеет место при $U/A>1,3$. Если $d=4,0$ м, то этот фактор уже характерен при $U/A>1,5$.

На рис.7 показаны графики взаимосвязи отношения U/A и ширины различных типов фундаментов: ленточных, квадратных, прямоугольных при различном значении коэффициента η . Задавая величину осадки для конкретного фундамента при определенных значениях P и d , определяем отношение U/A , а затем по графику $b=f(U/A)$ можно определить требуемую ширину фундамента любой формы. Это особенно удобно при проектировании фундаментов под различные конструкции и когда требуется выровнять их осадки.

Заключение

Проведенный анализ выявил незначительное влияние глубины заложения фундаментов, их формы, размеров на осадки, распределение напряжений и деформаций в активной зоне. С ростом d при прочих равных условиях снижаются осадки фундаментов незначительно, независимо от формы. Это связано с принятым в расчете требованием $P \leq R$. Учет образования зон пластических деформаций под краями фундамента увеличивает их величины за счет выпора грунта из-под фундамента.

Установлено, что осадка ленточного фундамента практически во всем диапазоне давлений на грунт всегда больше осадки равного по ширине квадратного, круглого и прямоугольного фундаментов. Превышение осадки ленточного фундамента, при одинаковой ширине с прямоугольным, составляет 1,7 раз. Увеличение глубины заложения подошвы незначительно уменьшает его осадку, не более чем на 20%.

Предложенный метод определения ширины фундамента способствует выравниванию его осадки при любой форме в плане, что предрасполагает к увеличению напряжений по краям подошвы фундамента.

Глубину заложения подошвы фундаментов, как правило, принимают по данным технико-экономического сравнения рассматриваемых вариантов. Вместе с тем, следует иметь в виду тот факт, что увеличение d для фундаментов на естественном основании ведет к удорожанию работ нулевого цикла, а при глубине $d>5,0$ м может быть причиной разуплотнения дна котлована.

Список цитированных источников

1. Кушнер, С. Г. Расчет осадок оснований зданий и сооружений / С. Г. Кушнер. – Киев : Будівельник, 1990. – 144 с.
2. Александрович, В. Ф. Фазы деформации, пластические зоны в основании и осадки ленточного фундамента // В. Ф. Александрович, В. Г. Федоровский // Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении: Т. II.: Методы проектирования эффективных конструкций фундаментов / НИИОСП. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 114-115.
3. Зиновьев, А. В. Определение деформаций основания конечной толщины под кольцевым фундаментом / А. В. Зиновьев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – №3. – С. 23-25.
4. Кушнер, С. Г. Напряженно-деформированное состояние основания конечной толщины / С. Г. Кушнер ; – М., 1982.–18 с. –Деп. в ЦИНИС Госстроя СССР, №3190.
5. Гольдштейн, М. Н. Расчет осадок и прочности оснований зданий и сооружений / М. Н. Гольдштейн, С. Г. Кушнер, М. И. Шевченко. – Киев : Будівельник, 1977. – 208 с.
6. Осадки строящихся сооружений / Ю. В. Россихин, А. Г. Битайнис ; под ред. А. М. Скудры. – Рига : Зинатне, 1980. – 339 с.
7. Малышев, М. В. Образование и развитие пластической области под краем фундамента при различном коэффициенте бокового давления грунта / М. В. Малышев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1975. – №1. – С. 8-16.

References

1. Kushner, S. G. Raschet osadok osnovanij zdaniy i sooruzhenij / S. G. Kushner. – Kiev : Budivel'nik, 1990. – 144 s.
2. Aleksandrovich, V. F. Fazy deformatsii, plasticheskie zony v osnovanii i osadki lentochного fundamenta // V. F. Aleksadrovich, V. G. Fedorovkij // Uskorenie nauchno-tekhnicheskogo progressa v fundamentostroenii: T. II.: Metody proektirovaniya effektivnyh konstrukcij fundamentov / NIIOСП. – М.: Strojizdat, 1987. – S. 114-115.
3. Zinov'ev, A. V. Opredelenie deformatsij osnovaniya konechnoj tolshchiny pod kol'ceвым fundamentom – A. V. Zinov'ev // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. – 1979. – №3. – S. 23-25.
4. Kushner, S. G. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie osnovaniya konechnoj tolshchiny / S. G. Kushner ; – М., 1982. –18 s. –Dep. v CINIS Gosstroya SSSR, №3190.
5. Gol'dshtejn, M. N. Raschet osadok i prochnosti osnovanij zdaniy i sooruzhenij / M. N. Gol'dshtejn, S. G. Kushner, M. I. SHEvchenko. – Kiev : Budivel'nik, 1977. – 208 s.
6. Osadki stroyashchihsya sooruzhenij / YU. V. Rossihin, A. G. Bitajnis ; pod red. A. M. Skudry. – Riga : Zinatne, 1980. – 339 s.
7. Malyshev, M. V. Obrazovanie i razvitie plasticheskoy oblasti pod kraem fundamenta pri razlichnom koefficiente bokovogo davleniya grunta / M. V. Malyshev // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. – 1975. – №1. – S. 8-16.