

### **Оптимизация проектирования фундаментов**

Саенков Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Промышленное и гражданское строительство»

Балаковский инженерно-технологический институт – филиал федерального  
государственного автономного образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Балаково

*Для решения главной задачи проектирования фундаментов и грунтовых оснований – недопустимости превышения предельных деформаций, назначаемых по условиям нормальной эксплуатации, – необходимо точно знать изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания и механизм его разрушения.*

Изучению вопроса развития областей предельного состояния грунта при нагружении основания и их влияния на работу основания штампов был посвящен ряд экспериментальных работ, например, работа [1]. Следует обратить внимание на следующее обстоятельство: все известные нам экспериментальные исследования проводились с помощью штампов, состоящих из некоторого количества соединенных квадратных модулей, обеспечивающих различное соотношение длин сторон подошвы штампа. При этом на результаты экспериментов в явном виде влиял фактор размера штампа, поскольку из общего курса механики грунтов известно, что при увеличении размеров штампов увеличивается размер активной зоны сжатия основания и соответственно другие значимые параметры, определяющие работу грунтового основания.

С целью исключения влияния фактора размера штампа нами была выполнена серия экспериментов по изучению изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания при его нагружении штампами различной формы, но постоянной площади.

При анализе работы грунтового основания под нагрузкой неизбежно встает вопрос о необходимости учета формы подошвы фундаментов, поэтому в механике грунтов традиционно рассматривается 3 самостоятельные задачи: плоская – при обсуждении ленточных фундаментов, осесимметричная – при обсуждении фундаментов с круглой подошвой, и пространственной – при обсуждении прямоугольных фундаментов с различным соотношением сторон.

Так действующими строительными нормами СП 22.13330.2016 рекомендован расчет несущей способности основания по формуле:

$$N_u = b' l' (N_\gamma \xi_\gamma b' \gamma_I + N_q \xi_q d \gamma_I' + N_c \xi_c c), \quad (1)$$

где  $\xi_\gamma, \xi_q, \xi_c$  – коэффициенты формы фундамента, вычисляемые по формулам:

$$\xi_\gamma = 1 - 0.25/\eta, \quad \xi_q = 1 + 1.5/\eta, \quad \xi_c = 1 + 0.3/\xi_q = 1 + 1.5/\eta, \quad (\eta = l/b), \quad (2)$$

$L$  и  $b$  – длина и ширина подошвы фундамента соответственно, принимаемые в случае внецентренного приложения равнодействующей нагрузки равными приведенным значениям  $l'$  и  $b'$ .

Некоторые авторы, а также, например, немецкие нормы определяют коэффициенты формы по-иному и принимают их с учетом прочностных характеристик грунтом следующими формулами:

$$v_\gamma = 1 - 0.3b/l, \quad v_q = 1 + b \sin \varphi / l, \quad v_c = (v_q N_q - 1) / (N_q - 1). \quad (3)$$

Очевидно, что в настоящее время неоднозначно даже толкование термина «коэффициент формы»: в одних случаях для прямоугольных фундаментов он зависит только от соотношения длин сторон, в других – и от угла внутреннего трения.

Вспомним, что исходной зависимостью при определении общих упругих деформаций полупространства является формула Ж. Буссинеска для вертикальных перемещений точек, лежащих на ограничивающей полупространство плоскости ( $z=0$ ) при действии на полупространство сосредоточенной силы  $P$ :

$$w_z = P / (\pi C R), \quad (4)$$

где  $C$  – коэффициент упругого полупространства  $C = E / (1 - \mu^2)$ .

Общепринятой формой этой зависимости в настоящее время является

$$S_{упр} = \omega p b (1 - \mu^2) / E. \quad (5)$$

Здесь  $\omega$  – коэффициент формы площади подошвы фундамента и жесткости фундамента (одинаковый для всей площади загрузки или различный для разных ее точек), т. е. при определении деформаций используется коэффициент формы, который зависит не только от соотношения сторон подошвы фундамента, но и других параметров (в различных практических методах расчетов это и жесткость фундамента, и относительная толщина активного слоя грунта, и др.).

В практике реального проектирования фундаментов обязательным расчетом является определение осадки фундамента. Действующими нормами СП 22.13330.2016 при расчете осадок коэффициент формы учитывает изменение напряжений по глубине

для фундаментов круглых, прямоугольных с различным соотношением длин их сторон и ленточных (при отношении длины фундамента к его ширине более 10).

С целью получения возможности прогнозирования поведения фундаментов разных форм и обоснования выбора их рационального варианта автор предложил новый коэффициент формы [3]:

$$\lambda = P/d, \quad (6)$$

где  $P$  – периметр фундамента;  $d$  – длина диагонали подошвы фундамента (или в общем случае диаметр описанной окружности).

Введение данного более универсального показателя позволяет оценить форму подошвы любых фундаментов и описать единой зависимостью изменения их расчетных параметров (табл. 1). Значения данного показателя изменяются в пределах от  $\lambda = 2,0$  для ленточного фундамента до  $\lambda = \pi$  для круглого фундамента ( $\lambda = P/d = \pi d/d = \pi$ ).

Таблица 1

Значения расчетных данных

Форма подошвы штампа	Отношение длин сторон	Коэффициент формы $\lambda$
Круг		$\pi$
квадрат	1:1	2,83
прямоугольник	2:1	2,68
прямоугольник	4:1	2,43
прямоугольник	10:1	2,20
Лента		2,0

Анализ результатов наших экспериментов позволил установить, что механизм работы грунтового основания качественно аналогичен для штампов с подошвами разной формы. Например, для квадратного штампа результаты приводились в работе [2]. Следовательно, возможно объединение 3 самостоятельных задач при описании работы грунтового основания, нагруженного фундаментами с подошвами любой формы, и выполнение расчетов на основе единого механизма взаимодействия с грунтовым основанием фундаментов с подошвами любых форм.

Подобие процессов деформирования основания фундаментов с подошвами разных форм под нагрузкой позволяет установить зависимость изменения количественных параметров работы основания от формы подошвы фундаментов. Следовательно, результаты расчета параметров работы фундамента одной формы

позволят прогнозировать изменения расчетных параметров работы фундаментов других форм подошвы.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет определить зависимости практически важных величин, характеризующих работу оснований, от коэффициента формы подошвы штампов – предельной нагрузки и осадки. Графики этих зависимостей приведены на рис. 1.

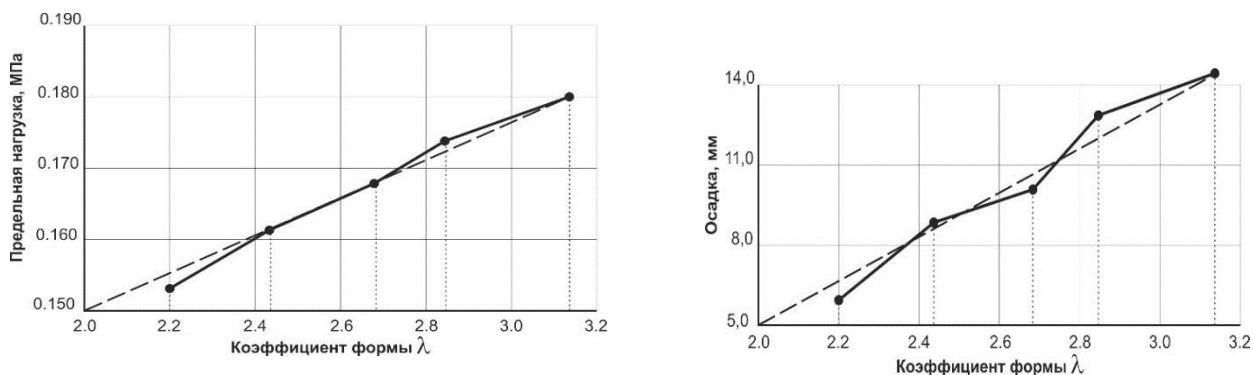


Рис. 1. Графики зависимости предельных нагрузок и осадок на штампы от  $\lambda$

Полученные зависимости в первом приближении аппроксимируем уравнением прямой вида  $y=ax+b$  и с учетом наличия точных решений и подстановки постоянных значений исследуемых величин получим:

- например, для обязательного при проектировании расчета осадки фундамента выбранной формы:

$$S_i = S^* - (\lambda^* - \lambda_i) k_s, \quad (7)$$

в частности,  $S_i = S^O - (\lambda^O - \lambda_i) k_s = S^O - (\pi - \lambda_i) k_s$  или

$$S_i = S^{III} - (\lambda^{III} - \lambda_i) k_s = S^{III} - (2 - \lambda_i) k_s,$$

где  $S^*$  – осадка штампа, принятого в качестве исходного;  $S_i$  – осадка проектируемого фундамента;  $S^O$  – осадка штампа с круглой подошвой;  $S_{III}$  – осадка ленточного штампа;  $\lambda_i$  – коэффициент формы подошвы проектируемого фундамента;  $k_s$  – параметр прямой, устанавливаемый экспериментально.

Одним неопределенным параметром данной зависимости является  $k_s$ . Для его определения необходимо построить график зависимости осадок фундаментов от нагрузок, для чего достаточно определить осадки для фундаментов с подошвами 2 форм.

Применение данного метода возможно в рамках действующих строительных норм следующим образом:

1) на первом этапе с помощью расчетных формул, рекомендованных действующими нормативными документами для реальных условий, определяются осадки двух фундаментов необходимой площади, например, с квадратной подошвой и ленточного;

2) на втором этапе необходимо построить график зависимости осадки фундаментов от коэффициента формы  $\lambda$  и определить  $k_s$ ;

3) теперь возможно решение 2 вариантов задачи:

- возможно аналитически определить осадку фундамента принятой проектируемой формы подошвы;

- возможно задать требуемое значение осадки фундамента (например, при точном соблюдении условий технологических факторов (например, ограниченные деформации примыкающих подземных коммуникаций и т. п.) и определить обоснованную в данном случае форму подошвы проектируемого фундамента.

#### Литература

1. Домбровский, В. Н. К вопросу о разрушении песчаного основания прямоугольными штампами / В. Н. Домбровский. – Тр. НИИОСПа, 1984. – Вып. 74. – С. 9-15.

2. Саенков, А. С. Развитие областей предельного состояния грунта в основании квадратного штампа / А. С. Саенков, С. А. Елизаров, М. В. Малышев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1991. – № 2. – С. 15-17.

3. Саенков, А. С. Коэффициент формы подошвы фундамента как основа метода проектирования оптимального фундамента / А. С. Саенков // Научные труды 19 межвузовской российской научной конференции «Векторная энергетика в технических, биологических и социальных системах». – 2018. – Вып. № 1 (14). – С. 3-6.