

Михаил Иванович НИКИТЕНКО,
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой
"Геотехника и экология в строительстве"
Белорусского национального
технического университета

Сергей Владимирович ИГНАТОВ,
магистр технических наук,
ассистент кафедры
"Геотехника и экология в строительстве"
Белорусского национального
технического университета

ОТЛИЧИЯ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПО ЕВРОПЕЙСКИМ И НАЦИОНАЛЬНЫМ НОРМАМ

DIFFERENCES BETWEEN EUROPEAN AND NATIONAL STANDARDS ON DESIGN OF SLAB FOUNDATIONS

В статье на примерах расчетов фундаментов на песчаных и глинистых грунтах показано отличие результатов, получаемых по национальным и европейским нормам. Приводится сравнение особенностей решения задачи определения несущей способности грунта по названным нормам.

This article gives the examples of designing the foundations on sandy and clayey soils and shows the differences in results obtained by using European and national standards. A comparison concerning the ways of solving the problem of determining the bearing capacity of the soil has been made between the European and national standards.

ПРЕДПОСЫЛКИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПО ТКП EN 1997-1 [1]

Еврокод [1] основывается на работах Прандтля, Терцаги, Мейергофа, Бюисмана, Дебера, Везичи. Общий подход к расчету оснований фундаментов этих исследователей сходен. Фундамент бесконечной длины шириной b передает среднее давление q_0 на однородный грунт с объемным весом γ . Грунт непосредственно под фундаментом образует клин, который продавливает расположенный ниже грунт. Движение клина распирает грунт и сдвигает его в две стороны, в каждой из которых имеются: зона радиального сдвига, непосредственно примыкающая к клину и фундаменту, и зона линейного сдвига, следующая за радиальной. Несущая способность основания равна сопротивлению сдвигу, оказываемому этими зонами, как показано на рис. 1 [2, 3].

Движение к низу грунтового клина под разрушающей нагрузкой от фундамента Q встречает сопротивление со стороны сил, действующих по двум плоскостям АВ (см. рис. 1). Эти силы включают равнодействующую пассивного сопротивления грунта P_p и сцепления c , действующие вдоль поверхности клина АВ при его движении. Равнодействующая пассивного давления образует угол φ с нормалью к поверхности клина [2].

Если угол между гранью клина и горизонталью равен ψ , то угол между равнодействующей и вертикальной нагрузкой от фундамента составит $(\psi - \varphi)$. Соответственно полное сопротивление, оказываемое клином вертикальному перемещению, будет равно:

$$Q_0 = 2P_p \cdot \cos(\psi - \varphi) + 2\overline{AB} \cdot c \cdot \sin \psi = \\ = 2P_p \cdot \cos(\psi - \varphi) + bc \cdot \operatorname{tg} \psi.$$

Равнодействующая пассивного давления земли P_{py} может быть разделена на три составляющие:

- 1) P_{py} — от веса зоны сдвига АВЕС;
- 2) P_{pc} — от сцепления c в грунте;
- 3) P_{pq} — от пригрузки q .

Эти компоненты пассивного давления рассчитываются раздельно, затем суммируются для получения общей несущей способности:

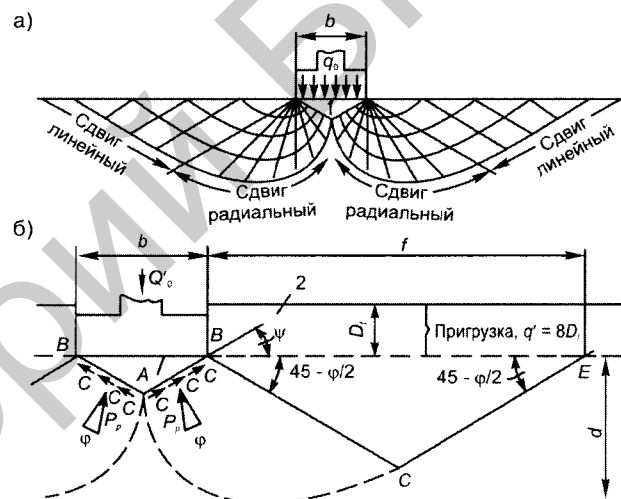


Рис. 1. Расчетная схема сдвига грунта в соответствии с ТКП EN [1] по теории пластичности

$$Q_0 = 2 \cdot (P_{py} + P_{pc} + P_{pq}) \cdot \cos(\psi - \varphi) + bc \cdot \operatorname{tg} \psi, \\ q_0 = \frac{2P_{py}}{b} \cdot \cos(\psi - \varphi) + \\ + \left[\frac{P_{pc} \cdot \cos(\psi - \varphi)}{b} + c \cdot \operatorname{tg} \psi \right] + \frac{2P_{pq}}{b} \cdot \cos(\psi - \varphi).$$

Каждая из компонент представляет собой функцию угла внутреннего трения и геометрии зоны разрушения, характеризуемой значениями параметров b и ψ .

К. Терцаги [3] определяет несущую способность при условии шероховатой подошвы фундамента, когда по плоскости контакта исключается горизонтальное смещение грунта, который как будто является частью фундамента. Поэтому вертикальная нагрузка передается клином на расположенный ниже грунт, и угол ψ может быть принят равным φ . Зона сдвига принимается простирающейся вверх до уровня подошвы фундамента таким образом, что единственный эффект от пригрузки заключается в создании давления q на зоны сдвига [2, 3].

Первый член общей формулы, определенный весом грунта, изменяется пропорционально ширине фундамента. В водонасыщенном глинистом грунте без трения

ширина фундамента не играет роли, а сцепление влияет только на второй член, который становится основным в несущей способности [2].

В ТКП EN [1] приведены две расчетные зависимости для определения несущей способности плитного фундамента.

Условия без дренирования

$$R/A' = (\pi + 2) \cdot c_u \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q,$$

где b_c, s_c, i_c — безразмерные коэффициенты для:
 — наклона подошвы фундамента $b_c = 1 - 2\alpha / (\pi + 2)$;
 — формы фундамента:
 $s_c = 1 + 0,2 (B'/L')$ — для прямоугольной формы;
 $s_c = 1,2$ — для квадратной или круглой формы;
 — наклона нагрузки с горизонтальной составляющей $H (H \leq A'c_u)$:

$$i_c = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' \cdot c_u}} \right);$$

c_u — прочность грунта при недренированном сдвиге, определяемая по формуле:

$$c_u = c \cdot \frac{\cos \varphi}{1 - 1/3 \sin \varphi} + \sigma_0 \cdot \frac{\sin \varphi}{1 - 1/3 \sin \varphi},$$

здесь $c_0 = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_{z,гп} + 2\sigma_{x,гп})$,

$$\sigma_{z,гп} = \sum \gamma_{z,гп},$$

$$\sigma_{x,гп} = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_{z,гп},$$

ν — коэффициент Пуассона, принимаемый:
 0,30 — для супесей; 0,35 — для суглинков;
 0,42 — для глин.

Условия с дренированием

$$R/A = c' \cdot N_c \cdot b_c \cdot s_c \cdot i_c + q' \cdot N_q \cdot b_q \cdot s_q \cdot i_q + 0,2 \gamma' \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot b_\gamma \cdot s_\gamma \cdot i_\gamma,$$

где значения безразмерных коэффициентов:

а) несущей способности:

$$N_q = e^{\pi \cdot \text{tg} \varphi} \cdot \text{tg}^2 \cdot (45^\circ + \varphi / 2),$$

$$N_c = (N_q - 1) \cdot \text{ctg} \varphi',$$

$$N_\gamma = 2 \cdot (N_q - 1) \cdot \text{tg} \varphi';$$

б) наклонной подошвы фундамента:

$$b_c = b_q - (1 - b_q) / (N_c \cdot \text{tg} \varphi'),$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \cdot \text{tg} \varphi')^2;$$

в) формы фундамента:

$s_q = 1 + (B'/L') \cdot \sin \varphi'$ — для прямоугольной формы;

$s_q = 1 + \sin \varphi'$ — для квадратной или круглой формы;

$s_\gamma = 1 - 0,3 \cdot (B'/L') \cdot \sin \varphi'$ — для прямоугольной формы;

$s_\gamma = 0,7$ — для квадратной или круглой формы;

$s_c = (s_q \cdot N_q - 1) / (N_q - 1)$ — для прямоугольной, квадратной или круглой формы;

г) наклона нагрузки за счет горизонтальной составляющей H :

$$i_c = i_q - (1 - i_q) / (N_c \cdot \text{tg} \varphi'),$$

$$i_q = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \text{ctg} \varphi')]^m,$$

$$i_\gamma = [1 - H / (V + A' \cdot c' \cdot \text{ctg} \varphi')]^{m+1},$$

где $m = m_B = [2 + (B'/L')] / [1 + (B'/L')]$, если H действует вдоль B' ;

$m = m_L = [2 + (L'/B')] / [1 + (L'/B')]$, если H действует вдоль L' .

Основные обозначения, применяемые в расчетных формулах:

- $A' = B' \cdot L'$ — эффективная площадь фундамента;
- b — значения коэффициентов для наклона подошвы фундамента с нижними индексами c, q и γ ;
- B — ширина фундамента;
- B' — эффективная ширина фундамента;
- e — эксцентриситет равнодействующей с нижними индексами B и L ;
- L — длина фундамента;
- L' — эффективная длина фундамента;
- m — показатель степени в формулах для коэффициентов наклона i ;
- N — коэффициенты с нижними индексами c, q и γ ;
- q — пригрузка или давление на уровне подошвы фундамента;
- q' — расчетное эффективное давление от чрезмерной нагрузки на уровне основания фундамента;
- s — коэффициенты формы подошвы фундамента с нижними индексами c, q и γ ;
- V — вертикальная нагрузка;
- α — наклон подошвы фундамента к горизонтали;
- γ — эффективный удельный вес грунта ниже подошвы фундамента.

Недостатком методики определения несущей способности по ТКП EN [1] является то, что в расчетной формуле учтено наличие больших эксцентриситетов и возможности отрыва подошвы от грунта основания, но не учитываются заглубление фундамента и наличие подвала (рис. 2).

ПРЕДПОСЫЛКИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПО НАЦИОНАЛЬНЫМ НОРМАМ [5]

Методика определения расчетного сопротивления оснований согласно [4, 5] базируется на допущениях:
 — при малом объеме зон пластических деформаций используется распределение напряжений по теории линейно деформируемого полупространства;
 — заглубление фундамента учитывается приложении давления

$$\sigma_{z,q} = \gamma \cdot (d + z),$$

где d — глубина заложения подошвы фундамента;
 z — допустимая глубина развития зон пластических деформаций;

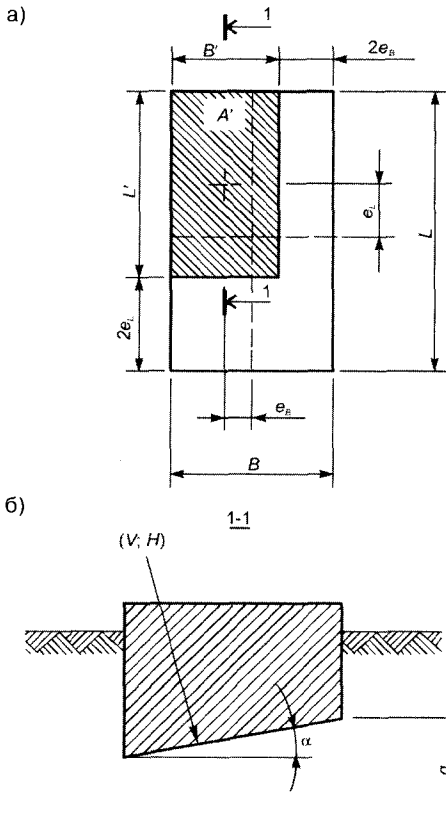


Рис. 2. Условные обозначения величин, применяемых при определении несущей способности грунта в соответствии с ТКП EN [1]:
 а – план подошвы фундамента;
 б – разрез

— напряжения от собственного веса грунта распределяются по геостатическому закону, т. е.:

$$\sigma_{zg} = \sigma_{xg} = \gamma d.$$

Эта методика применительно к представленной на рис. 3 расчетной схеме была разработана для ленточных центрально нагруженных гибких фундаментов на поверхности грунта и не учитывала:

- внецентренное приложение нагрузки и жесткость фундаментов;
- форму подошвы фундаментов (квадрат, круг, кольцо, прямоугольник, прерывистые и с угловыми вырезами);
- совместное воздействие горизонтальных и вертикальных нагрузок (подпорные стены, стены подвалов, каркасные здания и т. д.);
- взаимное влияние фундаментов

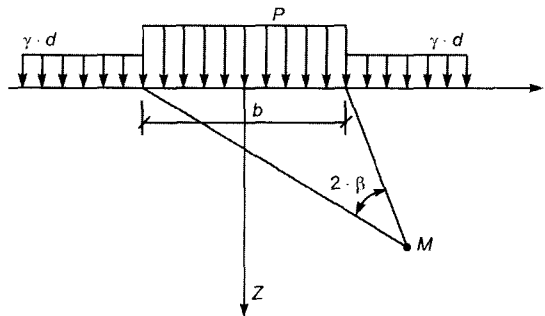


Рис. 3. Расчетная схема определения расчетного сопротивления основания по национальным нормам [5]

в местах пересечения стен и устройства осадочных швов, наличия вблизи них складываемых материалов.

В национальных нормах [5] глубина развития зон пластических деформаций принята равной 0,25b, при которой давление P определяется выражением:

$$P = M_\gamma \cdot b \gamma + M_q \cdot \gamma d + M_c \cdot c.$$

Это давление P, увеличенное в $\gamma_1 \gamma_2 / k$, названо расчетным сопротивлением основания R. Для R при наличии подвала и с учетом различий удельных весов грунта выше и ниже подошвы фундамента получено выражение:

$$R = \frac{\gamma_1 \cdot \gamma_2}{k} \cdot [M_\gamma \cdot k_2 \cdot b \gamma_{II} + M_q \cdot d_1 \cdot \gamma'_{II} + (M_q - 1) \cdot d_b \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot c_{II}].$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОСНОВАНИЙ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ПО НАЦИОНАЛЬНЫМ НОРМАМ [5, 6] И ТКП EN [1]

Расчетные схемы плитных фундаментов приведены в таблице 1. Вертикальная нормативная на-

Таблица 1

Варианты	Грунт в основании	
	Песчаный	Глинистый
Без подвала	<p>1</p>	<p>2</p>
Фундамент для средней колонны в подвале шириной 18 м	<p>3</p>	<p>4</p>

грузка на уровне обреза фундамента принята 1200 кН. Расчетные сопротивления грунтов основания под одиночным фундаментом с размерами в плане 1,8х2,4 м в подвале с толщиной пола 200 мм и без подвала при жесткости здания $L/H = 2,75$ определены по национальным нормам [5, 6] (таблица 2), а несущей способности грунта — по ТКП EN [1] (таблицы 3 и 4).

Таблица 2

Параметры в формуле	Показатели для фундаментов			
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4
γ_1	1,4	1,25	1,4	1,25
γ_2	1,3	1,05	1,3	1,05
k	1,0	1,0	1,0	1,0
φ , град	30°	20°	30°	20°
M_γ	1,15	0,51	1,15	0,51
M_q	5,57	3,06	5,57	3,06
M_c	7,95	5,66	7,95	5,66
k_z	1,0	1,0	1,0	1,0
b , м	1,8	1,8	1,8	1,8
γ_{II} , кН/м ³	19,5	20,0	19,5	20,0
d_1 , м	1,5	1,5	0,856	0,85
γ'_{II} , кН/м ³	17,5	17,5	17,5	17,5
d_b , м	0	0	2,0	2,0
c_{II} , кПа	0	25,0	0	25,0
R , кПа	339,572	315,24	516,432	364,19

Таблицы 2–4 содержат исходные данные о глубинах заложения фундаментов и свойствах грунтов.

В таблице 5 сопоставлены результаты расчетов по национальным [5] и европейским нормам [1]. Они свидетельствуют, что по ТКП EN [1] несущая способность глинистых грунтов оснований меньше расчетных сопротивлений грунта по национальным нормам [5], а песчаных превышает их значения в 2,9–3,5 раза.

Таблица 3

Параметры в формуле	Показатели для фундаментов	
	Ф2	Ф4
c^*_u , кПа	34,533	44,154
b_c	1,00	
s_c	1,15	
i_c	1,00	
q , кПа	0,50	3,00
R/A	204,688	264,075

Таблица 4

Параметры в формуле	Показатели для фундаментов	
	Ф1	Ф3
c , кПа	0	
φ , град	30°	
γ , кН/м ³	20,0	
$N_q; N_c; N_\gamma$, м	18,4; 30,14; 20,09	18,4; 30,14; 20,09
α , град	0°	
$b_c = b_q = b_\gamma$, м	1,0	
$s_c; s_q; s_\gamma$	1,396; 1,375; 0,888	
$i_c = i_q = i_\gamma$	1,0	
$q' = \gamma d$, кПа	26,25	57,75
R/A	985,06	1782,02

Таблица 5. Значение несущей способности основания по ТКП EN 1997-1 [1] и расчетного сопротивления грунта по СНБ 5.01.01 [5]

Определение показателя по нормативу, соотношение	Показатели для фундаментов			
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4
	Грунтовые условия основания			
	Песок средний средней прочности	Суглинок полутвердый	Песок средний средней прочности	Суглинок полутвердый
Несущая способность, кПа, по ТКП EN [1]	985,060	204,688	1782,020	264,075
Расчетное сопротивление, кПа, по СНБ 5.01.01 [5]	339,572	315,240	516,432	364,190
ТКП EN/СНБ	2,901	0,649	3,451	0,725

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила: ТКП EN 1997-1-2009 (02250).
2. Леонардс, Д. А. Основания и фундаменты / Д. А. Леонардс; пер. с англ. проф. М. Н. Гольдштейн. — М., 1968. — 504 с.
3. Терцаги, К. Строительная механика грунта на основе его физических свойств / К. Терцаги; пер. с нем. А. А. Черкасов, П. С. Рубан, П. П. Смирнин; под ред. Н. М. Герсеванова. — Л.: НТКП СССР, 1933. — 392.
4. Пилягин, А. В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений / А. В. Пилягин. — М.: АСВ, 2006. — 248 с.
5. Основания и фундаменты зданий и сооружений: СНБ 5.01.01-99.
6. Фундаменты плитные. Правила проектирования: ТКП 45-5.01-67-2007.

Статья поступила в редакцию 01.03.2011.