

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНДАМЕНТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ОСНОВАНИИ (РАСПРЕДЕЛЯЮЩИХ) СОГЛАСНО ЕВРОКОДУ 7

Тур В. В., Тарасевич А. Н., Дедок В. Н.

### Введение

В 1975 году в Европейском Сообществе (ЕС) было принято решение о разработке новой единой европейской системы норм и правил строительного проектирования - Еврокодов, которые на первом этапе были альтернативными нормами, а затем заменили национальные нормы. При этом вводились соответствующие Национальные приложения, учитывающие особенности проектирования в каждой стране. При этом Национальные приложения содержат, главным образом, только те положения, которые отнесены к т. н. национальноустанавливаемым параметрам (NDP). Целью этой программы было устранение технических препятствий в международном сотрудничестве, создание единого нормативного поля ЕС для работы проектных и строительных фирм.

Национальная адаптация Еврокодов предусматривала публикацию полного текста с титульным листом Госстандарта РБ, с национальным введением и приложением, в котором перечислены параметры, изменяемые Национальным приложением (NDP). В РБ были изданы нормативные документы: СТБ ISO 14688-1-2009 [1], СТБ ISO 14688-2-2009 [2], ТКП EN 1997-1-2009 [3], ТКП EN 1997-2-2009 [4]. Этими изданиями и закончилась гармонизация национальных норм с Еврокодом 7. В ТКП 45-5.01-254-2012 [5] нет ссылок на вышеуказанные документы. В статье рассматриваются основные положения Еврокода 7 по проектированию фундаментов на естественном основании и приведены результаты расчета оснований по разным подходам, рекомендованным Еврокодом 7.

Геотехническое проектирование предусматривает определение физико-механических характеристик и расчетного сопротивления грунтов основания, как материала. Величины характеристик грунтов являются определяющими при расчете оснований и фундаментов. Еврокод 7 состоит из двух частей: EN 1997 – 1. Общие положения и EN 1997 – 2. Исследования и испытания грунтов. Первая часть состоит из 12 разделов и 9 приложений, вторая – из 6 разделов и 24 приложений.

Положения Еврокода 7, как и всех других конструктивных Еврокодов, подразделяются на принципы (P) и правила. Принципы – это безальтернативные требования, которые должны быть выполнены в проекте (напр. осадка меньше допустимой), правила – это набор общепризнанных методов, которые удовлетворяют и не противоречат принципам. Рекомендованные в приложениях Еврокода 7 методы не являются обязательными, возможно применение и других методов расчета, если они не противоречат принципам. Проектировщик имеет право выбирать любые методы расчета, но несет ответственность за надежность конструкции, поэтому обычно используются методы приведенные в Еврокоде 7.

При геотехническом проектировании следует руководствоваться общими принципами изложенными в EN 1990:2002. Конструкции следует проектировать и изготавливать таким образом, чтобы они в течение предусмотренного срока эксплуатации с требуемым уровнем надежности и без необоснованных экономических затрат:

- воспринимали все воздействия и влияния, появление которых, во всей вероятности, следует ожидать в процессе возведения и эксплуатации;
- оставались пригодными для предусмотренной эксплуатации по назначению. [6]

Для каждой геотехнической проектной ситуации следует проверить, что не будет превышено ни одно из возможных предельных состояний определенных в EN 1990:2002. Предельные состояния могут возникнуть в грунтовом основании или сооружении, или совместно в основании и сооружении. Предельные состояния следует проверять одним из методов указанных ниже или их комбинацией:

- посредством расчетов;
- по предписаниям;
- с использованием опытных моделей и пробных нагрузок;

- методом наблюдения.

Практический опыт часто показывает, какой вид предельного состояния является определяющим для конкретного проекта.

С целью установления требований к документации и геотехническим проектам вводится три геотехнические категории: 1, 2, 3. Геотехническая категория 1 включает только малые и относительно простые сооружения, 2 – типовые сооружения и фундаменты, 3 – сооружения не вошедшие в 1 и 2.

### 1. Геотехническое проектирование посредством расчетов

Этот метод, в первую очередь, требует принятия расчетной модели основания. Расчетная модель может быть аналитической, полуэмпирической, численной. Любая модель должна быть точной или давать запас надежности с учетом установленных неопределенностей. В большинстве случаев применяется аналитическая модель, в которой несущая способность и перемещения основания описываются алгоритмами расчетов. Если используется эмпирическая зависимость, то необходимо однозначно удостовериться, что она соответствует данным грунтовым условиям строительной площадки. Пригодны численные методы, которые учитывают в предельном состоянии совместные деформации или взаимодействие сооружения и основания.

#### 1.1 Воздействия

В геотехническом проектировании учитывают следующие воздействия (F): собственный вес грунта, воды, давление грунта и грунтовых вод, постоянные и переменные нагрузки от сооружения, смещения грунта, перемещения и ускорения, вызванные землетрясениями, взрывами, вибрациями и динамическими нагрузками. В проекте должна рассматриваться возможность приложения переменных воздействий совместно или по отдельности. В соответствии с ЕН 1990 [6], воздействия (F) подразделяются на: постоянные (G), переменные (Q), особые (A). Расчетные значения воздействий ( $F_d$ ) либо оценивают непосредственно, либо умножением характеристического значения постоянного ( $G_k$ ) или репрезентативного значения ( $Q_{rep}$ ) переменного воздействия на соответствующие частные коэффициенты ( $\gamma_F$ ).

$$G_d = \gamma_G G_k \quad (1)$$

$$Q_d = \gamma_Q Q_{rep} \quad (2)$$

$$Q_{rep} = \psi Q_k \quad (3)$$

где  $G_k, Q_k$  – характеристическое значение постоянных и переменных воздействий;

$Q_{rep}$  – репрезентативное значение переменных воздействий;

$\psi$  - коэффициент сочетаний переменных воздействий;

$\gamma_G, \gamma_Q$  – значения частных коэффициентов для постоянных и переменных воздействий, принимаемых по таблице 1.

Таблица 1 - Значения частных коэффициентов для постоянных и переменных воздействий.

Воздействие	Символ	Состав коэф.		
		A1	A2	
Постоянные	неблагоприятные (дестабил.)	$\gamma_{G, dst}$	1.35	1.0
	благоприятные (стабил.)	$\gamma_{G, stb}$	1.00	1.0
Переменные	неблагоприятные (дестабил.)	$\gamma_{Q, dst}$	1.50	1.0
	благоприятные (стабил.)	$\gamma_{Q, stb}$	0	0
Особые	неблагоприятные	$\gamma_A$	1.00	1.0

#### 1.2 Расчетные величины геотехнических параметров

Расчетные величины геотехнических параметров ( $X_d$ ) определяют или непосредственно, или рассчитывают по формуле:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (4)$$

где  $X_k$  – характеристическое значение геотехнического параметра;  
 $\gamma_M$  – частный коэффициент для величин характеристических свойств грунтов, определяемый по таблице 2.

Таблица 2 - Значения частных коэффициентов для величин свойств грунтов.

Параметр грунтов	Символ	Состав коэф.	
		M1	M2
Угол внутреннего трения (к тангенсу)	$\gamma_\varphi$	1.0	1.25
Сцепление (в эффективных напряжениях)	$\gamma_c$	1.0	1.25
Недренированное сопротивление сдвигу	$\gamma_{cu}$	1.0	1.40
Одноосное сопротивление на сжатие (пригрузка)	$\gamma_{qu}$	1.0	1.40
Удельный вес	$\gamma_T$	1.0	1.00

### 1.3 Геометрические параметры

К геометрическим данным относят:

- отметки поверхности грунта;
- уровни грунтовых вод;
- отметки границ инженерно-геологических элементов;
- размеры геотехнических конструкций (фундаментов, свай, подпорных стен и т.д.).

Если отклонения геометрических параметров не влияют на надежность сооружения, то расчетные значения ( $a_d$ ) принимают равным характеристическим ( $a_k$ )

$$a_d = a_k \quad (5)$$

Если отклонения влияют на надежность то

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (6)$$

где  $\Delta a$  – максимальное отклонение от номинального ( $a_{nom}$ ) (характеристического) размера.

### 1.4. Предельные состояния и их проверки

В Еврокоде 7 рассматривают следующие предельные состояния:

- потеря устойчивости сооружения или основания как жесткого тела (потеря устойчивости положения или равновесия), когда прочность материалов сооружения и грунта не имеют значения для обеспечения предельного состояния (EQU);
- разрушения или чрезмерные деформации сооружения или его элементов, когда расчетные сопротивления материалов являются определяющими для обеспечения несущей способности (STR);
- разрушение или чрезмерные деформации основания, когда расчетное сопротивление грунта является решающим для обеспечения несущей способности (GEO);
- потеря устойчивости сооружения или основания (потеря вертикального равновесия) от действия Архимедовой силы (всплытия) или других вертикальных воздействий (UPL);
- вынос частиц грунта, вызванный гидравлическим градиентом (HYD).

#### 1.4.1. Потеря устойчивости сооружения или основания

При рассмотрении предельного состояния равновесия (EQU) проверяется выполнение условия:

$$E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d \quad (7)$$

где  $E_{dst;d}$  – расчетная величина эффектов дестабилизирующих (опрокидывающих, сдвигающих) воздействий;

$E_{stb;d}$  – расчетная величина эффектов стабилизирующих (удерживающих) воздействий;

$T_d$  – эффект действия дополнительных стабилизирующих воздействий (напр. анкеровка).

Правила определения  $E_{dst;d}$  и  $E_{stb;d}$  в символьной форме следующие:

$$E_{dst;d} = E \left\{ \gamma_F F_{rep}; \gamma_{Fg} F_g(X_k); a_d \right\}_{dst}; \quad (8)$$

$$E_{stb;d} = E \left\{ \gamma_F F_{rep}; \gamma_{Fg} F_g(X_k); a_d \right\}_{stb}; \quad (9)$$

где  $\gamma_{Fg} F_g(X_k)$  – выражение в данном случае обозначает эффект геотехнического воздействия в Еврокоде 7 записано как  $X_k/\gamma_M$ , что не совсем корректно.

Как видно из формул, величины эффектов дестабилизирующих и стабилизирующих воздействий следует определять от действия расчетных значений конструкционных и геотехнических воздействий и расчетных значений геометрических данных. На практике, рассматривают закон равновесия опрокидывающих и удерживающих моментов приложенных к сооружению или его части.

#### 1.4.2. Разрушения или чрезмерные деформации сооружения или его элементов (STR)

Проверка несущей способности конструкций (STR) требует выполнения условия:

$$E_d \leq R_d, \quad (10)$$

где  $E_d$  – расчетная величина эффектов воздействий;

$R_d$  – величина расчетного сопротивления материала.

Эффектом воздействий является внутренняя сила в геотехнической конструкции (изгибающий момент, продольная сила, поперечная сила).

В зависимости от материала, примененного для изготовления геотехнической конструкции используются соответствующие нормы проектирования (нормы железобетонных, каменных и т.д. конструкций).

#### 1.4.3. Разрушение или чрезмерные деформации основания (GEO).

Проверка несущей способности основания (GEO) требует выполнения условия:

$$E_d \leq R_d, \quad (11)$$

где  $E_d$  – расчетная величина эффектов воздействий;

$R_d$  – предельная величина несущей способности основания.

Эффектом воздействий является вектор сил, который передается от геотехнической конструкции (фундамента, подпорной стенки) на грунт. В случае проверки на сдвиг принимается сила, действующая по поверхности скольжения.

Правила определения  $E_d$  и  $R_d$  могут быть представлены в символьной форме следующими выражениями:

- эффекты воздействий:

$$E_d = E \{ \gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d \}, \quad (12)$$

или

$$E_d = \gamma_E E \{ F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d \}, \quad (13)$$

- несущая способность основания:

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d \}, \quad (14)$$

или

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k; a_d \} / \gamma_R, \quad (15)$$

или

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k/\gamma_M; a_d \} / \gamma_R, \quad (17)$$

$\gamma_R$  – частный коэффициент несущей способности, определяемый по таблице 3.

Таблица 3 – Значения частных коэффициентов несущей способности  $\gamma_R$  для фундаментов на естественном основании.

Несущая способность	Обозначение	Состав		
		R1	R2	R3
на сжатие	$\gamma_{R,v}$	1.0	1.4	1.0
на сдвиг	$\gamma_{R,h}$	1.0	1.1	1.0

В EN 1997-1[3] предложено три подхода при рассмотрении предельных состояний (GEO). Каждому подходу соответствует свой набор частных коэффициентов. Выбор соответствующего подхода определяется в Национальном приложении.

**Подход 1.**

За исключением проектирования свай и анкеров на осевую нагрузку (центрально нагруженных) должно проверяться, что не наступит предельное состояние по несущей способности или деформациям при следующих комбинациях (сочетаниях) частных коэффициентов:

Комбинация (сочетание) 1. A1 “+” M1 “+” R1

Комбинация (сочетание) 2. A2 “+” M2 “+” R1

В комбинации 1 частные коэффициенты применяются к воздействиям и параметрам прочности грунта. В комбинации 2 - к воздействиям, сопротивлениям грунтов основания и иногда к параметрам прочности грунта.

**Подход 2.**

Комбинация(сочетание). A1 “+” M1 “+” R2.

В этом подходе частные коэффициенты применяются к воздействиям или эффектам воздействий и к сопротивлениям грунтов основания.

**Подход 2\*.**

Комбинация(сочетание). A1 “+” M1 “+” R2.

Это упрощенный подход 2, в котором расчетное сопротивление грунтов основания определяется с использованием характеристических значений воздействий, а не расчетных. Этот подход предложен в Германии и сейчас применен во многих странах.

**Подход 3.**

Комбинация 1.(A1 или A2)“+” M1 “+” R3

A1 – для воздействий от сооружений,

A2 – для геотехнических воздействий.

В этом подходе частные коэффициенты применяются к воздействиям или эффектам воздействий и к сопротивлениям грунтов основания.

**1.4.4. Проверка предельного состояния (UPL) архимедово всплытие сооружения или грунта**

В случае, когда сооружению или основанию угрожает потеря вертикального равновесия в результате всплытия, вызванного действием воды в порах необходимо проверить условие:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d \quad (18)$$

где  $V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d}$

$V_{dst;d}$  – расчетная величина дестабилизирующих вертикальных воздействий на сооружение;

$G_{stb;d}$  - расчетная величина постоянных стабилизирующих вертикальных воздействий;

$R_d$  – величина расчетного сопротивления против воздействия;

$G_{dst;d}$  - расчетная величина постоянных дестабилизирующих вертикальных воздействий;

$Q_{dst;d}$  – расчетная величина переменных дестабилизирующих вертикальных воздействий;

### 1.4.5. Проверка предельного состояния (НУД) вынос грунта, вызванный гидравлическим градиентом.

Если механизм разрушения связан с выносом частиц грунта, внутренней эрозией, гидравлическим продавливанием, вызванный силами фильтрации тогда проверяется условие:

$$S_{dst;d} \leq G'_{stb;d} \quad (19)$$

где  $S_{dst;d}$  – расчетная величина дестабилизирующей фильтрационной силы в основании;

$G'_{stb;d}$  – расчетная величина постоянных стабилизационных воздействий (удельный вес грунта с учетом взвешивания).

$$S_{dst;d} = \gamma_{G;dst} S_{dst;k} \quad (20)$$

где  $\gamma_{G;dst}$  – частный коэффициент для постоянных неблагоприятных воздействий.

$$S_{dst;k} = i \gamma_w V \quad (21)$$

где  $i$  – гидравлический градиент;

$V$  – объем грунта на который действует сила фильтрации;

$\gamma_w$  – удельный вес воды.

## 2. Проверка предельного состояния по эксплуатационной пригодности сооружения

Еврокод 7 в геотехническом проектировании выделяет три вида предельных состояний по эксплуатационной пригодности:

- предельное состояние по деформациям;
- предельное состояние при просадках, набухании, замораживании и т. п. (при строительстве на специфических грунтах);
- предельное состояние по колебаниям.

В практике геотехнического проектирования мы всегда проводим расчет по деформациям (расчет осадок, разницы осадок, кренов, углов поворота) и для них должна быть установлена предельная величина. Остальные предельные состояния возникают при проектировании оснований и фундаментов в особых условиях строительства или при динамических воздействиях. По предельному состоянию эксплуатационной пригодности всегда рассчитываются и геотехнические конструкции (прогибы, ширина раскрытия трещин в фундаментах, подпорных стенах).

Проверка по деформациям выполняется по условию:

$$E_d \leq C_d \quad (22)$$

где  $E_d$  – расчетная величина эффектов воздействий (проверяемого параметра);

$C_d$  – предельное значение эффектов воздействий.

Эффектом воздействий в зависимости от предельного состояния будет: осадка, разница осадок, просадка, подъем фундамента при набухании грунта, ускорение, амплитуда колебаний, прогиб фундамента, величина раскрытия трещин.

Еврокод 7 требует, чтобы при определении расчетных величин эффектов воздействий частные коэффициенты принимались равными 1.0, что равнозначно использованию в проверочных расчетах характеристических величин воздействий, характеристических значений геотехнических и геометрических параметров.

Предельное значение эффектов воздействий ( $C_d$ ) назначается таким образом, что при их превышении в сооружении наступает предельное состояние. Еврокод 7 требует, чтобы эти величины были согласованы с заказчиком и были указаны в проекте. [2.4.8(5)P].

## 3. Проектирование по предписаниям

Если расчетные модели отсутствуют или они не нужны, то наступление предельного состояния можно избежать благодаря применению действий определенных в предписаниях.

Такое проектирование охватывает традиционные (условные) и в общем осторожно определенные правила проектирования, а также требования по выбору и контролю материалов, качества выполнения работ, обеспечения безопасности и эксплуатации сооружения. Проектирование по предписаниям допустимо, когда есть сопоставимый опыт, который делает излишним проведение расчетов. Такое проектирование можно применять для определения морозостойкости, химической и биологической агрессии, действие которых невозможно учесть расчетом.

#### **4. Проектирование с использованием модельных и натуральных опытов (пробные нагружения и испытания на опытных моделях)**

Если при проектировании используются результаты испытаний нагрузкой или испытания крупных или мелких моделей, в целях обоснования проектного решения или проверки других подходов указанных в п 2.1(4) [3], надо рассматривать и учитывать следующие факторы:

- различие в грунтовых условиях при модельных испытаниях и реальным объектом;
- влияние времени, особенно если продолжительность испытаний значительно меньше, чем длительность загрузки реальной конструкции;
- влияния масштаба, особенно если используются маломасштабные модели. Следует учитывать влияние величины напряжений, совместно с влиянием размера частиц грунта.

Испытания также можно проводить на элементах реального сооружения, на элементах модели натуральной величины или меньшего масштаба.

#### **5. Метод наблюдений (наблюдательный метод)**

Если прогнозировать сохранность грунтового основания затруднительно, можно использовать подход, известный как «наблюдательный метод», при котором проектные решения могут корректироваться во время строительства.

При этом до начала строительства должны быть выполнены следующие требования:

- должны быть установлены допустимые границы изменения характеристик;
- оценены пределы изменения характеристик и показана достаточная вероятность того, что реальные характеристики будут находиться в допустимых границах;
- разработана программа мониторинга, в ходе которого будет подтверждаться, что реальные характеристики лежат внутри принятых границ. Контроль должен проводиться в реальном времени и с достаточно короткими интервалами, чтобы в случае опасности, была возможность принятия возможных действий.
- время реакции приборов и анализ результатов должны быть достаточно быстрыми в отношении возможного изменения ситуации;
- должен быть разработан план возможных действий, которые нужно применять, если в результате контроля обнаружится, что характеристики лежат вне границ принятых значений;

#### **6. Фундаменты на естественном основании (распределяющие)**

##### **6.1. Общие положения**

К фундаментам, рассматриваемым в шестом разделе Еврокода 7 относятся: столбчатые, ленточные и плитные. Некоторые положения этого раздела применяются и для фундаментов глубокого заложения, таких как кессоны, опускные колодцы.

В разделе 6 рассматриваются следующие положения:

- предельные состояния (6.2 [1]);
- воздействия и расчетные ситуации (6.3[1]);
- вопросы проектирования и строительства (6.4 [1]);
- проверка предельных состояний по несущей способности (6.5 [1]);
- проверка предельных состояний по эксплуатационной пригодности (6.6 [1]);
- фундаменты на скальном основании (6.7 [1]);
- проектирование конструкций фундаментов (6.8 [1]);
- подготовка основания (6.9 [1]).



## 6.2. Предельные состояния

При проектировании фундаментов на естественном основании проверяется, чтобы не наступили следующие предельные состояния:

- потеря общей устойчивости;
- истощение несущей способности, продавливание или выпор;
- потеря несущей способности в результате сдвига;
- совместная потеря несущей способности основания и разрушение фундамента, (следует понимать потерю несущей способности фундамента, которая вызывает потерю несущей способности основания);
- разрушение сооружения, вызванное перемещением фундамента (не связанного с деформацией основания);
- чрезмерные осадки;
- чрезмерный подъем от набухания грунта, морозного пучения и других причин;
- недопустимые вибрации.

## 6.3 Воздействия и расчетные ситуации

Воздействия определяются в соответствии с EN 1990:2002 и EN 1991. При определении воздействий, принимаемых в проекте, необходимо учитывать взаимодействие между сооружением и основанием. Временные воздействия могут рассматриваться по отдельности и одновременно, продолжительность воздействий может влиять на фильтрационные свойства и сжимаемость мелкозернистых грунтов. Следует отдельно рассматривать многократно повторяющиеся воздействия, а также воздействия с переменной интенсивностью, которые могут оказать специфическое влияние на грунт, например разжижение. Динамические воздействия учитываются отдельно.

В расчетах рассматриваются кратковременные и длительно действующие расчетные ситуации.

## 6.4. Проектирование (распределяющих) фундаментов и строительство

При выборе глубины заложения фундаментов необходимо учитывать:

- глубину залегания несущего слоя;
- принимать глубину, при которой усадка и набухание глинистых грунтов, в результате сезонных климатических условий или из-за деревьев и кустов, не влияет на деформации основания;
- глубину морозного пучения;
- уровень грунтовых вод, а также затраты при отрывке котлована ниже уровня грунтовых вод;
- возможные перемещения основания и уменьшение прочности несущего слоя за счет фильтрации воды, климатических воздействий или строительных работ;
- влияние земляных работ на соседние фундаменты и сооружения;
- влияние земляных работ по устройству коммуникаций вблизи фундаментов;
- влияние температур от сооружения;
- возможность подмыва;
- влияние изменения влажности при длительной засухе, а затем дождливом периоде на структурно-неустойчивые грунты в засушливых регионах;
- содержание в грунте растворимых элементов, например: гипса, известняков, аргиллитов.

Для проектирования фундаментов на естественном основании используется один из следующих методов:

- прямой метод, в котором отдельно выполняется расчет по каждому предельному состоянию. При проверке возможности наступления предельного состояния несущей способности, расчет должен моделировать наиболее правдоподобный механизм разрушения. При проверке эксплуатационной пригодности проводится расчет осадок.



- косвенный метод, использующий сопоставимый опыт и результаты полевых и лабораторных исследований или наблюдений, а также нагрузки соответствующие предельному состоянию эксплуатации, выбранные так, чтобы были выполнены требования всех этих предельных состояний.

- предписывающий метод, в котором используется предполагаемая несущая способность.

## 6.5. Проектирование по расчетным предельным состояниям

### 6.5.1. Общая устойчивость

Общую устойчивость грунтов с фундаментами или без них необходимо проверять в следующих ситуациях:

- на природном склоне или откосе или вблизи их;
- вблизи котлованов или подпорных стен;
- вблизи рек, каналов, озер, резервуаров, берегов морей;
- вблизи горных выработок и подземных конструкций.

### 6.5.2. Несущая способность основания

#### 6.5.2.1. Общие положения

Для всех расчетных предельных состояний должно выполняться следующее условие:

$$V_d \leq R_d. \quad (23)$$

Величина  $V_d$  учитывает вес фундамента, вес материала засыпки и давление грунта. Давление воды, не вызванное нагрузкой фундамента, учитывается отдельно.

Величина  $R_d$  – определяется в соответствии с п. 2.4 [1].

#### 6.5.2.2. Аналитический метод

Следует использовать общепризнанные аналитические методы. В приложении D [1] приведены формулы аналитического метода расчета несущей способности. При аналитическом определении  $R_d$  необходимо рассматривать длительные и кратковременные ситуации, особенно для мелкодисперсных грунтов. При расчете необходимо учитывать слоистую структуру основания, принимая для каждого слоя свои расчетные характеристики. Если более прочный слой подстилающий, то необходимо выполнить проверку по подстилающему слою, а для расчета использовать характеристики слабого слоя.

Расчетная несущая способность без дренирования:

$$R_k = A [(p+2)c_u b_c s_c i_c + q], \quad (24)$$

$b_c = 1 - \frac{2a}{\pi+2}$  – коэффициент учитывающий наклон подошвы;

$s_c$  – коэффициент, учитывающий форму фундамента;

$s_c = 1 + 0.2 \frac{B}{L}$  – для прямоугольной формы;

$s_c = 1.2$  – для квадратной или круглой.

$i_c = \frac{1}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{H}{Ac_u}} \right)$  – коэффициент, учитывающий горизонтальную составляющую нагрузки.

$$A' = B' L'; \quad B' = B - 2e_B; \quad L' = L - 2e_L.$$

$B', A'$  – приведенная ширина и длина фундамента;

$e_B, e_L$  – эксцентриситет вдоль стороны B и L.

Расчетная несущая способность с дренированием:

$$R_k = A'(c'N_c b_c s_c i_c + q'N_q b_q s_q i_q + 0.5 \gamma'N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma), \quad (25)$$

где  $N_q = e^{\pi \tan \varphi'} \tan^2(45 + \frac{\varphi'}{2})$ ;

$$N_c = (N_q - 1) \cot \varphi';$$

$$N_\gamma = 2 (N_q - 1) \tan \varphi';$$

$$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \tan \varphi'};$$

$$b_q = b_\gamma = (1 - \alpha \tan \varphi')^2; \quad \alpha - \text{угол наклона подошвы.}$$

$$s_q = 1 + \left(\frac{B'}{L'}\right) \sin \varphi';$$

$$s_\gamma = 1 - 0.3 \left(\frac{B'}{L'}\right);$$

$$s_c = \frac{s_q N_q - 1}{N_q - 1};$$

$$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + A c' \cot \varphi'}\right)^m;$$

$$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \tan \varphi'};$$

$$i_\gamma = \left(1 - \frac{H}{V + A c' \cot \varphi'}\right)^{m+1};$$

$$m = m_B = \frac{2 + \frac{B'}{L'}}{1 + \frac{B'}{L'}} \quad H - \text{действует вдоль стороны } B;$$

$$m = m_L = \frac{2 + \frac{L'}{B'}}{1 + \frac{L'}{B'}} \quad H - \text{действует вдоль стороны } L.$$

Если горизонтальная составляющая нагрузки образует угол  $\theta$  с направлением  $L$  то,  $m$  вычисляется по формуле:

$$m = m_B = m_L (\cos \theta)^2 + m_R (\sin \theta)^2.$$

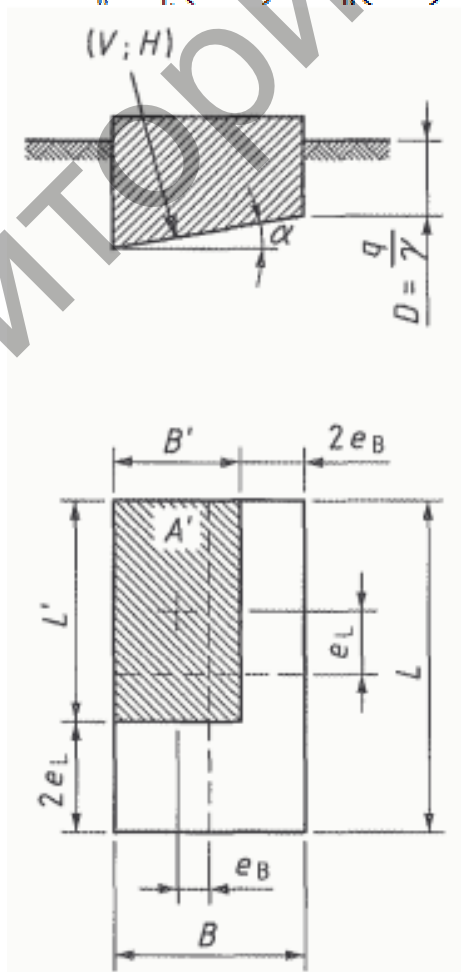


Рисунок 1 - Обозначения величин

### 6.5.2.3. Полуэмпирический метод

Следует использовать общепризнанные полуэмпирические методы. В приложении Е [1] приведен пример полуэмпирического метода определения расчетного сопротивления основания с использованием результатов прессиометрических испытаний.

При использовании прессиометрических испытаний необходимо учитывать, что проектная несущая способность грунта  $R_d$  под фундаментом при вертикальной нагрузке связана с предельным давлением на грунт следующей линейной зависимостью:

$$R_d/A = \sigma_{v,0} + k p_{1z}^* \quad (26)$$

где  $k$  - коэффициент несущей способности;

$\sigma_{v,0}$  - начальное полное вертикальное напряжение;

$p_{1z}^*$  - расчетное эквивалентное предельное давление (из прессиометрического испытания).

Численные значения коэффициента несущей способности  $k$  находятся в диапазоне от 0,8 до 3,0, в зависимости от типа грунта, заглубления и формы фундамента.

Расчетное эквивалентное предельное давление ( $p_{1z}^*$ ) вычисляется из полного предельного давления ( $p_1^*$ ), которое определяется для прессиометрического испытания как разность ( $p_1 - p_0$ ) между предельным значением  $p_1$  и горизонтальным давлением грунта в покое  $p_0$  на глубине испытания;

$p_0$  может быть определено по формуле:

$$p_0 = K_0 q' + u, \quad (27)$$

где  $K_0$  - коэффициент давления грунта в покое,

$q'$  - эффективное (приведенное) давление пригрузки,

$u$  - поровое давление воды.

### 6.5.2.4. Предписывающий метод, использующий предположение о несущей способности

Пример метода определения предполагаемого расчетного сопротивления рекомендован в приложении G [1], результат оценивается на основе сопоставимого опыта.

## 7. Проектирование по эксплуатационным предельным состояниям (осадкам)

Для частично и полностью водонасыщенных грунтов рассматриваются следующие три составляющих осадок:

-  $S_n$  для полностью водонасыщенных грунтов – мгновенная осадка, вызванная деформациями сдвига при постоянном объеме, а для частично водонасыщенного грунта – деформации сдвига и уменьшение объема;

-  $S_1$  - осадка за счет консолидации;

-  $S_2$  - осадка за счет ползучести.

В приложении F описаны примерные методы оценивания осадок  $S_0$  и  $S_1$ , которые можно использовать для расчетов. Глубину сжимаемой толщи принимают из условия, что эффективные напряжения от фундамента составляют 20% напряжений от собственного веса грунта.

### 7.1. Метод суммирования деформаций слоев основания (метод послойного суммирования)

Полную осадку фундамента на связном или несвязном грунте можно определить, используя зависимость деформаций от напряжения в следующем порядке:

- определить напряжения в основании, вызванные нагрузками на уровне подошвы фундамента. Напряжения в основании можно определить методами теории упругости, обычно для однородного, изотропного грунта и линейного распределения напряжений под фундаментом;

- определить деформации в грунтовом основании от напряжений, с применением модуля деформации или других зависимостей напряжение-деформация, полученных по результатам испытаний грунта в лаборатории (предпочтительно калиброванных по опытам) или полевыми испытаниями;

- суммировать (интегрировать) полученные вертикальные деформации с целью определения осадок.

При применении метода послойного суммирования, необходимо выбрать достаточное количество точек в основании, в которых определяются напряжения и деформации.

### **7.2. Упрощенный метод упругого пространства (теории упругости)**

Общую осадку фундамента на связном или несвязном грунте можно определить с использованием теории упругости по формуле:

$$s = \frac{p b f}{E_m}, \quad (28)$$

где  $p$  – контактное давление, линейно распределенное по подошве фундамента;

$b$  – меньший размер фундамента;

$f$  – коэффициент осадки фундамента;

$E_m$  – модуль упругости.

Значение коэффициента осадки фундамента зависит от формы и размеров фундамента, изменения жесткости грунта по глубине, мощности сжимаемой толщи, коэффициента Пуассона, расположения в плане давления от фундамента и точки где определяется осадка.

Если нет измеренных осадок на подобных фундаментах и в аналогичных грунтовых условиях, то расчетный модуль деформации в дренированном состоянии сжимаемого слоя можно определять в лабораторных или натуральных условиях.

Упрощенный метод применяется только тогда, когда напряжения не вызывают пластических деформаций основания и зависимость «напряжение – осадка» линейна. Нужно проявлять большую осторожность при использовании данного метода для неоднородного основания.

### **7.3. Осадки в недренированном состоянии**

Составляющую кратковременной осадки без дренажа можно определять методом послойного суммирования или упрощенным методом, принимая модуль деформации и коэффициент Пуассона, полученный при испытании грунтов без дренажа.

### **7.4. Осадки фундаментов за счет консолидации**

Для расчета осадки за счет консолидации можно использовать графики одометрических испытаний грунтов. Суммирование осадок без дренажа и за счет консолидации дает завышенные результаты, поэтому нужно использовать эмпирические поправки.

### **7.5. Развитие осадки во времени**

Скорость роста осадки в процессе первичной консолидации можно определять приближенно, используя параметры консолидации, полученные из компрессионных испытаний. Однако скорость роста осадки предпочтительнее определять, используя коэффициент фильтрации, полученный в натуральных испытаниях, тогда осадка от уплотнения будет вычислена с учетом водопроницаемости грунта.

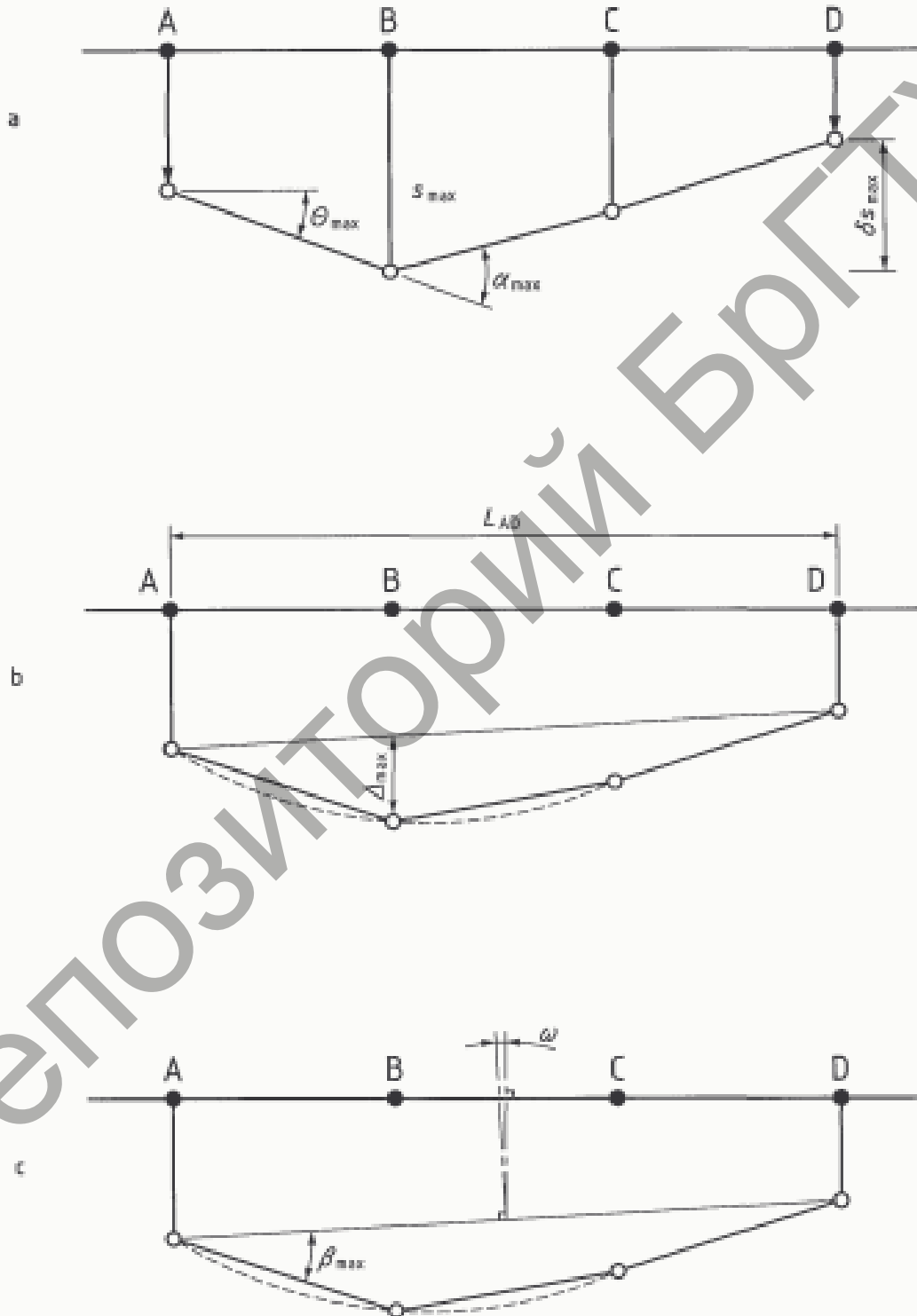
### **7.6. Предельные значения деформаций конструкций и перемещений фундаментов**

Необходимо учитывать следующие перемещения фундаментов (приложение Н): осадку, разницу осадок, поворот, крен, относительный прогиб, относительный поворот, горизонтальное перемещение и амплитуду колебаний.

Максимально допустимые относительные повороты при прогибах незаполненных и заполненных рамных конструкций, несущих или самонесущих кирпичных стен разные, однако их значение в пределах 1/2000 – 1/300 обеспечивает несущую способность по деформациям. Для многих конструкций допустимый максимальный относительный поворот 1/500, а пре-

дельный, вызывающий аварийное состояние 1/150. При выгибах принимается 0,5 величины от указанных выше значений.

Для обычных сооружений с отдельно стоящими фундаментами осадка допускается до 50 мм. Большие значения допустимы, когда относительный поворот находится в допустимых пределах, а полная осадка не препятствует подключению коммуникаций и не вызывает крена и т. п. Все это относится к типовым сооружениям и не применимо к нетиповым.



а – осадки  $S$ , неравномерной осадки  $\delta S$ , поворота  $\Theta$  и угловой деформации  $\alpha$ ;  
 б – стрелы прогиба  $\Delta$ , относительного прогиба  $\Delta/L_{AD}$ ;  
 в – крена  $\omega$ , относительного поворота (перекоса)  $\beta$ .  
 Рисунок 2 – определение перемещений фундамента:

### Примеры расчета

Для проведения анализа результатов расчетов по ТКП 45-5.01-67 и ТКП EN 1997-1 выполнены теоритические определения величин несущей способности грунтового основания представленного суглинком тугопластичным с расчетными характеристиками  $\varphi_n=20^\circ$ ;  $c_n=25 \text{ кПа}$ ,  $\gamma=19.0 \text{ кН/м}^3$ . Исходя из величины нагрузки действующей на фундамент  $G_k=300 \text{ кН}$ ,  $Q_k=136 \text{ кН}$  из расчета по деформациям определены размеры подошвы фундамента 1,5 x 1,5 м. Для сравнительного анализа выполнен расчет несущей способности основания по подходам 1, 2, 3 ТКП EN 1997-1 и ТКП 45-5.01-67, результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты сравнительных расчетов.

Подходы к расчету	Подход 1 (по ТКП EN 1997-1)		Подход 2 (ТКП EN 1997-1)	Подход 3 (ТКП EN 1997-1)	По ТКП 45- 5.01-67
	Комбинация 1	Комбинация 2			
Несущая способность основания, кН	1705,9	1072,4	1218,5	1072,0	1347,8
Расхождение результатов, %	149	102	77,8	56,0	142,5

### Список источников

1. СТБ ISO 14688-1-2009. Геотехнические исследования и испытания. Идентификация и классификация почв. Часть 1. Идентификация и описание. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2009. – 30 с.
2. СТБ ISO 14688-2-2009. Геотехнические исследования и испытания. Идентификация и классификация почв. Часть 2. Принципы классификации. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2009. – 27 с.
3. ТКП EN 1997-1-2009. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 1. Общие правила. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2009. – 119 с.;
4. ТКП EN 1997-2-2009. Еврокод 7. Геотехническое проектирование. Часть 2. Исследования и испытания грунта. – Введ. 2010-01-01. – Минск: Госстандарт, 2009. – 140 с.
5. ТКП EN 1990 – 2011. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций. – Введ. 2011-10-15. – Мн.: Министерство архитектуры и строительства РБ, 2012. - 61 с.