

### 2.3. Расчет оснований по несущей способности (п.5.7 СП 22.13330.2016)

Цель расчета оснований по несущей способности состоит в том, чтобы в условиях, допускающих возникновение первого предельного состояния, обеспечить прочность основания и устойчивость, трещиностойкость, прочность и нормальную эксплуатацию надземных конструкций сооружения.

Расчеты по несущей способности производятся лишь при определенных условиях нагружения, а также при неблагоприятных инженерно-геологических условиях площадки строительства. Для нескальных оснований п.5.1.9 СП 22.13330.2016 устанавливает следующие случаи, при которых такие расчеты необходимы:

- а) на основание передаются значительные горизонтальные нагрузки (подпорные стены, фундаменты распорных конструкций, углубление подвалов реконструируемых сооружений и т.п.), в том числе сейсмические;
- б) сооружение расположено на откосе или вблизи откоса;
- в) сооружение расположено вблизи котлована или подземной выработки;
- г) основание сложено дисперсными грунтами (медленно уплотняющимися водонасыщенными глинистыми, органоминеральными и органическими грунтами (при степени влажности  $S_r \geq 0,85$  и коэффициенте консолидации  $c_v \leq 10^7$  см<sup>2</sup>/год);
- д) основание сложено скальными грунтами;
- е) сооружение относится к геотехнической категории 3;
- ж) увеличивается нагрузка на основание при реконструкции сооружений.

Проверку оснований по несущей способности в случаях, приведенных в перечислениях а), б) и в), следует проводить с учетом конструктивных мероприятий, предусмотренных для предотвращения смещения проектируемого фундамента.

Различают две схемы разрушения основания (рис. . 2.3.1): плоский сдвиг по подошве фундамента или слабому прослойку; глубинный сдвиг. Необходимо, чтобы сочетание нагрузок на фундамент и конструктивные особенности подземной части здания допускали реализацию, принятых в расчете схемы и направления разрушения.

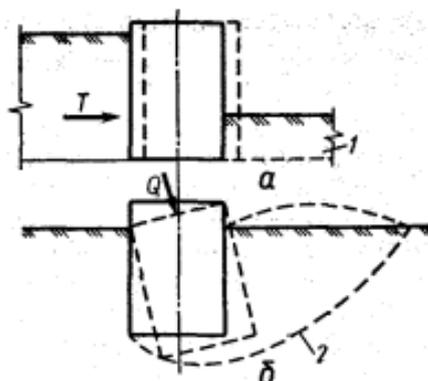


Рис. . 2.3.1. Схемы разрушения основания:  
*а* — плоский сдвиг; *б* — глубинный сдвиг; 1 — плоскость скольжения; 2 — поверхность скольжения

Используемые в практике проектирования способы расчета несущей способности оснований базируются на одной из следующих предпосылок: а) всю подошву фундамента охватывают пластические области (зоны предельного равновесия); б) под всей подошвой фундамента образуются изолированные поверхности скольжения заданной формы, вдоль которых происходит перемещение одной части массива относительно другой. При этом в каждой точке пластической области и на принятых поверхностях скольжения реализуется условие прочности Кулона.

$$\tau_u \leq \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (2.3.1)$$

В зависимости от того, какая из названных предпосылок используется, методы расчета несущей способности, рекомендуемые п.5.7. СП 22.13330, делятся на две группы: *аналитические методы*, базирующиеся на решениях теории предельного равновесия; *инженерные методы*, в которых очертание поверхностей скольжения задается из практических соображений (например,

метод круглоцилиндрических поверхностей, расчет на сдвиг по подошве фундамента).

Несущая способность основания считается обеспеченной при выполнении одного из условий в зависимости от способа расчета:

- при использовании аналитических методов расчета

$$F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} F_u \quad (2.3.2)$$

- при расчете графоаналитическим методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения

$$k = \frac{\sum M_{s,r}}{\sum M_{s,a}} > \frac{\gamma_n}{\gamma_c} \quad (2.3.3)$$

- при расчете на сдвиг по подошве фундамента

$$\sum F_{s,a} \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \sum F_{s,r}, \quad (2.3.4)$$

где все пояснения к формулам см. пп.5.7.1-5.7.14 СП.

### **Область применения методов расчета**

Многообразие методов расчета несущей способности основания predetermined сложностью задачи. Область применения каждого из рекомендуемых СП методов расчета зависит от ряда факторов: вида и состояния грунтового основания, характера нагрузок, инженерно-геологических условий площадки:

Различают *стабилизированное* и *нестабилизированное* состояния основания. Обжимающее (нормальное) давление  $\sigma$ , передаваемое стабилизированному основанию, целиком воспринимается скелетом грунта. Отсюда условие прочности в любой точке пластических областей или вдоль заданных поверхностей скольжения:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi_I + c_I \quad (2.3.5)$$

где  $\varphi_I$  и  $c_I$  — расчетные значения соответственно угла внутреннего трения и удельного сцепления.

Для нестабилизированного состояния основания характерно то, что нормальное напряжение  $\sigma$  воспринимается как скелетом грунта, так и поровой водой. Напряжения в скелете грунта, называемые *эффективными*, определяют, как разность между полным нормальным напряжением  $\sigma$  и избыточным поровым давлением  $u$ . Для нестабилизированного состояния основания критерий прочности

$$\tau = (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi_I + c_I \quad (2.3.6)$$

СП рекомендует определять избыточное давление в поровой воде методами фильтрационной консолидации грунтов, учитывая скорости приложения нагрузки в период строительства и эксплуатации.

Нестабилизированное состояние основания может возникнуть, если основание представлено медленно уплотняющимися водонасыщенными глинистыми грунтами и торфами при степени влажности  $S_r > 0,85$  и коэффициенте консолидации  $c_v < 10^7$  см<sup>2</sup>/год. Несущую способность оснований, сложенных такими грунтами, при высоких темпах возведения сооружения и при отсутствии в основании дренирующих слоев или специальных дренирующих устройств СП допускает в запас надежности определять в предположении, что все нормальное напряжение воспринимается поровой водой

$$\tau = c_I \quad (2.3.7)$$

Нагрузки, воспринимаемые фундаментом, в уровне подошвы фундамента в общем случае приводятся к пяти результирующим составляющим: вертикальной  $F_v$ , горизонтальным  $F_{h,x}$ ,  $F_{h,y}$ , моментам  $M_x$  и  $M_y$ . Горизонтальные составляющие  $F_h$  при неодинаковой пригрузке с различных сторон фундамента должны включать *активное давление грунта*. Все силовые факторы вычисляются с коэффициентами надежности по нагрузке  $\gamma_f > 1$ .

Определяя вид сдвига (глубинный или плоский), назначая метод расчета, а также рассчитывая несущую способность основания, используют угол наклона к вертикали  $\delta$ , равнодействующей внешней нагрузки на основание:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{F_h}{F_v}, \quad (2.3.8)$$

где  $F_h$ ,  $F_v$  - соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие внешней нагрузки на основание в уровне подошвы фундамента. В частности, для стабилизированных оснований использование аналитического решения А.С. Строгонова (формула 5.32 СП) возможно при выполнении условия:

$$\operatorname{tg} \delta \leq \sin \varphi_t \quad (2.3.9)$$

где  $\varphi_t$  — угол внутреннего трения основания.

Для нестабилизированных оснований расчет по плоской схеме сдвига проводится при выполнении условия

$$\operatorname{tg} \delta > 0. \quad (2.3.10)$$

В расчетах принимается во внимание направление действия момента  $M_{x(y)}$  и горизонтальной силы  $F_{hx(y)}$  вдоль каждой оси. Если эти силовые факторы действуют в противоположных направлениях, расчет по схеме глубинного сдвига ведут по двум вариантам: вдоль горизонтальной составляющей  $F_h$  и по направлению действия момента  $M$ .

В зависимости от состояния основания и характера нагрузок СП рекомендует различные методы расчета несущей способности (табл.2.3.1).

При глубинном сдвиге для стабилизированного и нестабилизированного состояний основания используют аналитические решения А.С. Строганова и В.В. Соколовского или инженерный метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения. Дополнительные указания, позволяющие выбрать метод расчета среди альтернативных способов в зависимости от условий загрузки и инженерно-геологических условий, следующие.

Таблица 2.3.1

Методы расчета для определения несущей способности оснований

Состояние основания	Вид сдвига	Метод расчета при	
		$\text{tg } \delta < \sin \varphi_1$	$\text{tg } \delta \geq \sin \varphi_1$
Стабилизированное	Глубинный	Решение А.С.Строганова ф.5.32СП метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения	Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения
	Плоский	Плоский сдвиг не реализуется	Расчет на сдвиг по подошве фундамента
Нестабилизированное	Глубинный	Для ленточных фундаментов – решение В.В.Соколовского ф.5.37СП прямоугольных – решение А.С.Строганова ф.5.32СП метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения	
	Плоский	Расчет на сдвиг по подошве фундамента при $\text{tg } \delta > 0$	

1. Решение А.С. Строганова используется для расчета однородных оснований (формула 5.32 СП)

$$N_u = b' \cdot l' (N_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot b' \cdot \gamma_I + N_q \cdot \xi_q \cdot \gamma' \cdot d_I + N_c \cdot \xi_c \cdot c_I), \quad (5.32 \text{ СП})$$

При различной вертикальной пригрузке с разных сторон фундамента интенсивность большей из них не превышает  $0,5R$  ( $R$  — расчетное сопротивление грунта основания). При этом требование об однородности стабилизированного основания должно выполняться для грунта ниже подошвы фундамента до глубины не менее ее ширины; при нестабилизированном основании однородный грунт ниже подошвы фундамента шириной  $b$  должен простираться до глубины не менее  $0,75b$ . Кроме того, при глубинном сдвиге при нестабилизированном состоянии формула (5.32 СП) применяется для прямоугольных фундаментов, если  $l/b \leq 3$  при действии на них только вертикальной нагрузки, полагая  $\varphi_1 = 0$ ;  $\xi_c = 1 + 0,11/\eta$ ;  $c_I = c_u$ .

2. Использование решения В. В. Соколовского [см. формулу (5.37 СП)]

$$n_u = b' \cdot [q + (1 + \pi + \cos \alpha) \cdot c_I], \quad (5.37 \text{ СП})$$

все пояснения см. СП

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{f_h}{b' \cdot c_I} \right)$$

для ленточных фундаментов допускается при однородном основании ниже подошвы фундамента до глубины не менее  $0,75b$ , при отсутствии более слабого подстилающего слоя и при выполнении условия (5.39 СП).

$$f_h \leq b' \cdot c_I \quad (5.39 \text{ СП})$$

3. Графоаналитический метод, предполагающий построение круглоцилиндрических поверхностей скольжения, допускается применять при следующих условиях:

а) основание сложено неоднородными грунтами (прочностные характеристики отдельных слоев грунта могут варьироваться в пределах 200...300 %);

б) пригрузка основания с разных сторон фундамента неодинакова, причем интенсивность большей из них превышает  $0,5R$ ;

в) сооружение расположено на откосе, вблизи откоса или на крутопадающих пластах грунта;

г) для нестабилизированного состояния грунтов основания в условиях неприменимости формул (5.37 СП) или (11).

4. Во всех случаях, если на фундамент действуют горизонтальные нагрузки и основание сложено грунтами в нестабилизированном состоянии, следует проводить расчет фундамента на сдвиг по подошве (п.5.7.12 СП), ф. 2.3.4. или ф.5.36 СП.

**Расчет на сдвиг по подошве фундамента** (рис. 2.3.2) состоит в установлении соотношения сил  $F_{s,a}$  сдвигающих сооружение (фундамент), и сил, сопротивляющихся сдвигу,  $F_{s,r}$ .

Сумма сдвигающихся сил

$$\sum F_{s,a} = F_h + \sum E_{a,i} \quad (2.3.11)$$

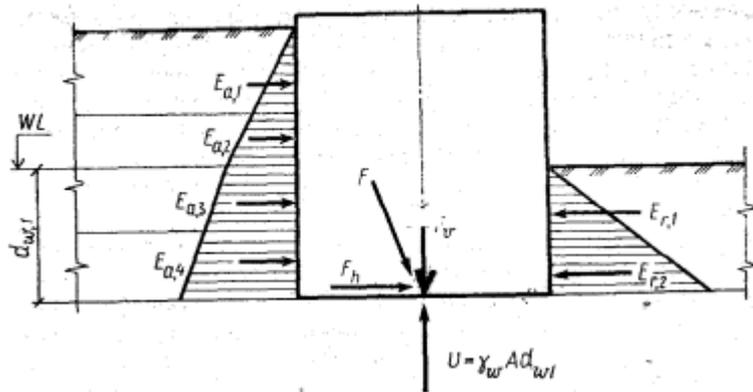


Рис. 2.3.2. Расчетная схема плоского сдвига

сумма сил, сопротивляющихся сдвигу,

$$\sum F_{s,r} = (F_v - U) \cdot \operatorname{tg} \varphi_I + A \cdot c_I + \sum E_{r,i} \quad (2.3.12)$$

где  $F_v$ ,  $F_h$  — соответственно вертикальная и горизонтальная составляющие нагрузки на фундамент;  $U$  — гидростатическое противодействие (при уровне грунтовых вод выше подошвы фундамента);  $\varphi_I$ ,  $c_I$  — прочностные параметры грунта под подошвой фундамента;  $A$  — площадь подошвы фундамента;  $E_{a,i}$  и  $E_{r,i}$  — соответственно активная и пассивная составляющие давления  $i$ -го слоя грунта.

Подставив значения  $\sum F_{s,a}$  и  $\sum F_{s,r}$  в выражение (2.3.4), проверяют условие недопущения плоского сдвига.

### Аналитические методы расчета

Аналитические методы базируются на следующих расчетных допущениях: а) грунт моделируется жесткопластическим телом Кулона или Сен-Венана; б) предельное равновесие, характеризуемое критерием Кулона, имеет место в любой точке зоны разрушения (пластической области), охватывающей всю подошву фундамента.

Решения аналитических методов в строгой постановке устанавливают очертание поверхностей скольжения и величину несущей способности основания в результате интегрирования системы дифференциальных уравнений равновесия с учетом критерия прочности Кулона. Такие строгие решения теории предельного равновесия получены лишь для нескольких случаев и не учитывают факторов, имеющих важное значение при проектировании фундаментов: влияние формы подошвы фундамента, эксцентричное приложение нагрузок и др. Учет указанных факторов осуществляется путем введения в строгие решения дополнительных допущений и эмпирических коэффициентов.

**Решение А. С. Строганова** (рис. 2.3.3). Приближенное аналитическое решение А. С. Строганова для однородного стабилизированного основания базируется на точном решении В. М. Новотворцева, определяющем несущую способность невесомого основания при действии наклонной нагрузки в условиях плоской деформации. В решении А. С. Строганова приближенно учитывается собственный вес грунта пластических областей  $G_1, G_2, G_3$ , что позволяет увеличить предельную нагрузку на грунт по сравнению с невесомым основанием.

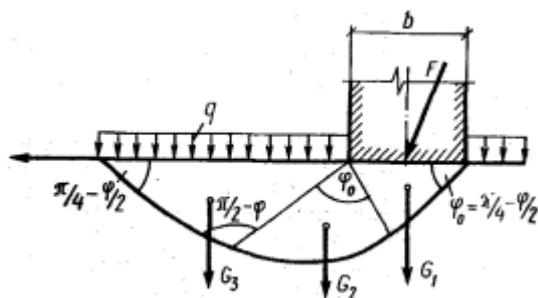


Рис. 2.3.3. Расчетная схема основания в решении А.С. Строганова

Распространение решения А. С. Строганова, полученного для ленточных симметрично нагруженных фундаментов, на фундаменты прямоугольные и эксцентрично нагруженные осуществляется введением коэффициентов формы фундаментов  $\xi$ , и приведенных размеров подошвы фундамента  $b'$  и  $l'$ .



## Инженерные методы

В инженерных методах предполагается, что потеря несущей способности сопровождается перемещением фундамента и части массива грунта относительно основного массива, по заданной поверхности скольжения. В ходе расчетов сопоставляют сдвигающие и силовые факторы, препятствующие сдвигу.

**Метод круглоцилиндрических поверхностей скольжения** разработан для ленточных фундаментов, а также допускается применять его для фундаментов ограниченной длины в запас надежности.

В проектной практике существует несколько разновидностей этого метода. Рассмотрим одну из модификаций при следующих основных допущениях.

1. Сдвигаемый массив грунта (призма выпирания) ограничен круглоцилиндрической поверхностью, касающейся нижнего края фундамента.

2. Силами взаимодействия между блоками грунта, на которые в процессе расчетов разбивают призму обрушения, пренебрегают.

3. Мерой устойчивости (коэффициентом устойчивости основания  $k_{уст.}$  считают отношение момента сил  $M_{s,r}$ , удерживающих призму обрушения, к моменту сдвигающих сил  $M_{s,a}$ , полагая, что потеря несущей способности основания наиболее вероятна при поверхности скольжения с коэффициентом  $k_{уст.,min}$

Расчет заключается в вычислении коэффициентов устойчивости при различных статически и кинематически возможных положениях центра поверхности скольжения (рис. 2.3.5). Значение коэффициента  $k_{уст.,min}$  определяют методом попыток. Рекомендуется следующий порядок вычислений.

1. Определяют расчетные нагрузки на обрезах фундамента, собственный вес фундамента и вес грунта на его уступах, а также расчетные характеристики грунтов основания, в том числе средневзвешенные показатели удельного веса

$\bar{\gamma}_1$  и угол внутреннего трения  $\bar{\varphi}_1$  слоистого основания в пределах глубины заложения фундамента.

2. Вычисляют активное давление грунта на фундамент в направлении ожидаемого сдвига. В наиболее часто встречающемся случае вертикальной боковой грани фундамента, слоистого основания и наличия пригрузки  $q$  по поверхности грунта равнодействующая активного давления (рис. 2.3.5) определяется по формуле (2.3.13)

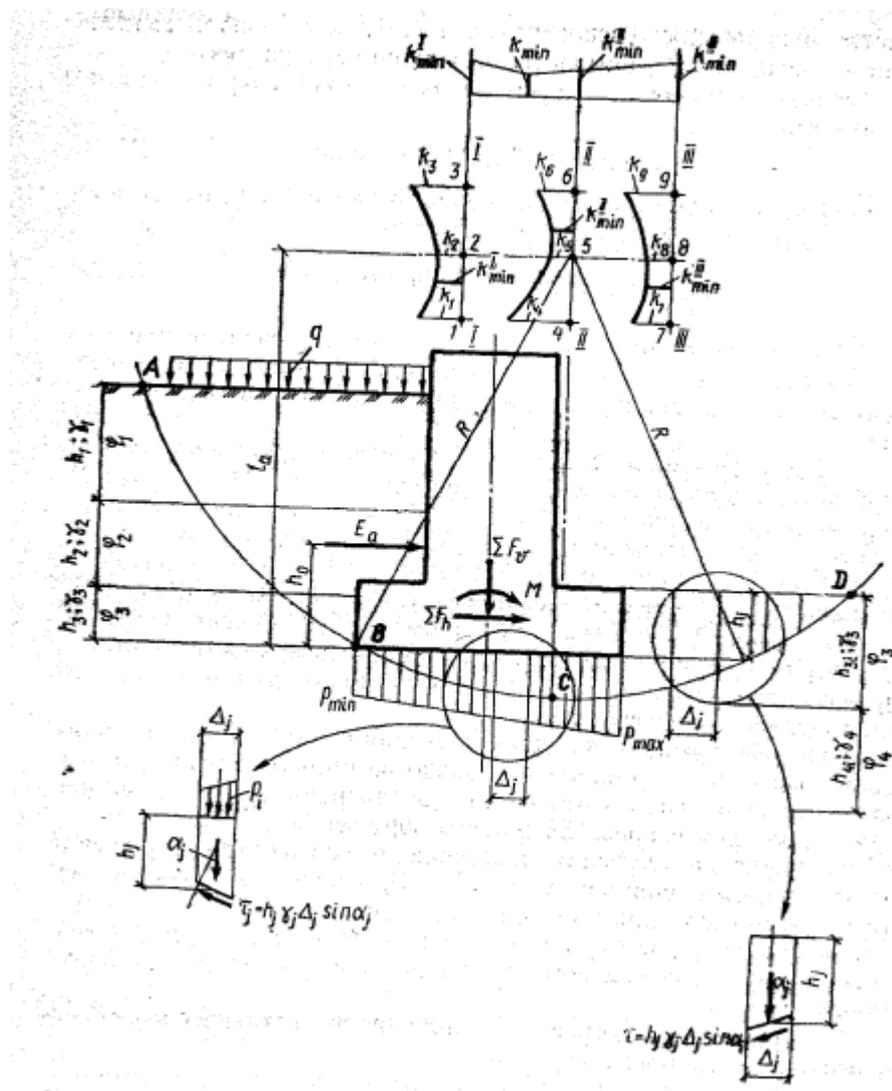


Рис. 2.3.5. Схема к расчету устойчивости основания методом круглоцилиндрических поверхностей

$$E_a = 0,5 \cdot \bar{\gamma}_1 \cdot d (d + 2 \cdot h_{eq}) \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45 - \frac{\bar{\varphi}_1}{2} \right), \quad (2.3.13)$$

где  $d$  — высота фундамента;

$\bar{\gamma}_I, \bar{\varphi}_I$  - средние в пределах высоты фундамента  $d$  значения соответственно удельного веса и угла внутреннего трения грунта,

$h_{eq} = \frac{q}{\gamma_I}$  - приведенная толщина грунта, статически эквивалентная пригрузке  $q$ .

Равнодействующая  $E_a$  приложена на расстоянии  $h_0$  от подошвы фундамента:

$$h_0 = \frac{d(d + 3h_{eq})}{3(d + 2h_{eq})} \quad (2.3.14)$$

3. Используя формулу внецентренного сжатия, определяют контактные давления по подошве фундамента:

$$p_{\max, \min} = \frac{\sum F_v}{b \cdot 1} \pm \frac{6 \cdot M}{b^2 \cdot 1} \quad (2.3.15)$$

где  $\sum F_v$  — сумма внешних вертикальных сил, включая собственный вес фундамента и грунта на его обрезах;  $M$  — момент по подошве фундамента от внешних сил без учета момента, вызванного силой  $E_a$ .

4. Задаются одним из возможных центров круглоцилиндрической поверхности скольжения (например, см, рис. 2.3.5, точка 1). Положение выбранного центра должно обеспечить кинематическую и статическую возможность принятой схемы потери устойчивости.

5. Проводят круглоцилиндрическую поверхность с радиусом  $R$ , равным расстоянию от выбранного центра (точка 1) до края подошвы (точка В), учитывая при этом два возможных варианта: а) поверхность скольжения начинается от поверхности грунта за фундаментом (точка А); б) поверхность скольжения начинается от края фундамента (точка В).

Равнодействующая активного давления грунта  $E_a$ , как внешняя сдвигающая сила, принимается только во втором варианте; в первом — давление грунта относится к внутренним усилиям, так как прикладывается в пределах призмы обрушения.

6. Принятую круглоцилиндрическую поверхность обрушения делят на блоки шириной  $\Delta_j = 0,1R$ . Для каждого блока определяют средневзвешенный

удельный вес грунта  $\bar{\gamma}_j$  (для песчаных грунтов ниже уровня воды  $\bar{\gamma}_j$  принимается с учетом взвешивающего действия воды) и угол  $\alpha_j$  между вертикалью и нормалью для  $j$ -го блока грунта.

7. Определяют коэффициент устойчивости для обоих вариантов поверхности скольжения:

поверхность скольжения начинается от поверхности грунта (см. рис. 2.3.5, точка А)

$$k_{\text{уст.}}^{(a)} = \frac{\sum M_{s,r}}{\sum M_{s,a}} = \frac{R_i \cdot \Delta_j \left[ \sum (f_j + \bar{\gamma}_j \cdot h_j) \operatorname{tg} \varphi_{ij} \cdot \cos \alpha_j + \sum \frac{c_{ij}}{\cos \alpha_j} \right]}{R_i \cdot \Delta_j \sum (f_j + \bar{\gamma}_j \cdot h_j) \sin \alpha_j} \quad (2.3.16)$$

поверхность скольжения начинается от края фундамента (рис. 2.3.5, точка В)

$$k_{\text{уст.}}^{(b)} = \frac{\sum M_{s,r}}{\sum M_{s,a}} = \frac{R_i \cdot \Delta_j \left[ \sum (f_j + \bar{\gamma}_j \cdot h_j) \operatorname{tg} \varphi_{ij} \cdot \cos \alpha_j + \sum \frac{c_{ij}}{\cos \alpha_j} \right]}{E_a (l - h_0) + \sum F_{v,t} \cdot a_t + R_i \cdot \Delta_j \sum (\bar{\gamma}_j \cdot h_j) \sin \alpha_j} \quad (2.3.17)$$

где  $R_i$  — радиус  $i$ -й поверхности скольжения;  $\Delta_j$  — ширина блоков, на которые разбивается призма обрушения;  $f_j$  — вертикальная составляющая на  $j$ -м участке поверхности скольжения (для блоков под фундаментом равна соответствующему контактному давлению по подошве фундамента  $f_j = p_j$ ; для блоков в зоне пригрузки на поверхности грунта  $f_j = q$ ; для остальных блоков  $f_j = 0$ );  $h_j$  — средняя высота  $j$ -го блока грунта;  $c_{ij}$ ,  $\varphi_{ij}$  — соответственно удельное сцепление и угол внутреннего трения того пласта грунта, в пределах которого находится подошва  $j$ -го блока;  $E_a$  — равнодействующая бокового давления грунта;  $l$  — расстояние по вертикали от центра вращения до подошвы фундамента;  $h_0$  — расстояние от подошвы фундамента до линии приложения равнодействующей  $E_a$ ;  $\sum F_{v,t} \cdot a_t$  — суммарный момент от вертикальных сил, включая вес фундамента и грунта на его уступах (плечо  $a_t$  силы  $N_t$  принимается относительно центра вращения);  $\bar{\gamma}_j$  — средневзвешенный вес  $j$ -го блока грунта;  $\alpha_j$  — угол между вертикалью

и нормалью для  $j$ -го блока; составляющие суммы  $\sum(\bar{\gamma}_j \cdot h_j) \sin \alpha_j$  принимаются с учетом знака угла  $\alpha_j$ .

Применительно к расчетной схеме (см. рис. 2.3.5) угол  $\alpha_j$  считают положительным на участке  $CD$  (нисходящая часть кривой скольжения) и отрицательным на участке  $ABC$  (восходящая часть кривой).

8. Если кинематически возможны другие положения центра вращения, то определяют коэффициенты устойчивости для поверхности скольжения с центрами в точках 2...9 (см. рис. 2.3.5).

9. Устанавливают коэффициент  $k_{уст.,min}$  по данным рассмотренных поверхностей скольжения. Для этого в произвольном масштабе отрезками прямой изображают значение коэффициентов устойчивости по вертикалям  $I...III$ . Определяя минимумы плавных кривых, соединяющих концы отрезков, устанавливают тем самым минимальные коэффициенты устойчивости по вертикалям  $I...III$ . Аналогичное построение для отрезков, изображающих  $k^I_{уст.,min} \dots k^{III}_{уст.,min}$  позволяет выявить коэффициент  $k_{уст.,min}$ .

10. Если полученный  $k_{уст.,min} > \frac{\gamma_n}{\gamma_c}$ , то несущую способность основания считают обеспеченной. В противном случае увеличивают габаритные размеры фундамента (глубину заложения, ширину подошвы) или переходят к другому типу фундамента.

В общем случае надежность расчетов методом круглоцилиндрических поверхностей зависит от того, насколько удачно выбран центр вращения, при котором коэффициент устойчивости будет минимальным. В подобных условиях повышению надежности расчета способствует *метод случайного поиска*, реализуемый с помощью ЭВМ.