

## Алгоритм расчета коэффициентов постели грунтового основания

### Алгоритм расчета коэффициентов постели грунтового основания.

Вычисление эффективного (природного, бытового) давления  $\sigma_{zg}$  производится на основании:

- удельного веса грунта  $\gamma$  в промежутке от УВУ до УГВ;
- удельного веса взвешенного грунта  $\gamma_{sb}$  в промежутке от УГВ до УВУ.

В системе ГРУНТ удельный вес взвешенного грунта определяется по формуле  $\gamma_{sb} = (\gamma_s - 1) / (1 + e)$ , где

$1$  – вес воды;

$\gamma_s = \gamma * (1 + e) / (1 + W)$  – удельный вес частиц грунта;

$W$  – влажность (в долях от 1);

$e$  – коэффициент пористости;

$h_{УГВ}$  – отметка уровня грунтовых вод, м;

$h_{УВУ}$  – отметка уровня водоупора, м.

На отметке УВУ образуется положительный скачок эффективного (природного, бытового) давления  $\sigma_{zg}$ , который равен  $(\gamma - \gamma_{sb}) * (h_{УГВ} - h_{УВУ})$ .

В программе **Расчет С1, С2** удельный вес взвешенного грунта определяется по формуле  $\gamma_{sb} = \gamma - 1$ .

1) Независимо от выбранной схемы расчета на основании отношения (1) определяется граница сжимаемой толщи  $H_c$  по схеме ЛПП с учетом требований СНиП 2.02.01-83\*, СП 50-101-2004, СП 22.13330.2011, ДБН В.2.1-10:2009.

$$\sigma_{zp} = \lambda \cdot \sigma_{zg}, \quad (1)$$

где

$\sigma_{zp}$  – дополнительное вертикальное напряжение на глубине  $Z = H_c$ ;

$\sigma_{zg}$  – вертикальное напряжение от собственного веса грунта.

$\lambda$  – коэффициент, определяемый соответствующими нормативами в зависимости от вида грунтов и типа сооружения; как правило,  $\lambda = 0.2$ .

### Расчет по схеме ЛПП в соответствии с СНиП 2.02.01-83\*

2) Осадка основания  $S$  по ЛПП вычисляется методом послойного суммирования по следующей формуле:

$$S = 0,8W \quad (2)$$

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zp,i} h_i}{E_i} ; \quad (3)$$

$h_i, E_i$  – соответственно толщина и модуль деформации  $i$ -го слоя грунта (с учетом его дробления на подслои);

$n$  – количество слоев грунта от подошвы фундамента до глубины  $Z = H_c$  с учетом дробления на подслои ( $i=1 \sim n$ ).

3) Для вычисления коэффициентов постели используются средние (в пределах зафиксированной глубины сжимаемой толщи  $H_c$ ) значения модуля деформации  $E_{ГР}$  и коэффициента Пуассона  $m_{ГР}$ . Эти значения вычисляются в соответствии с формулами 11 и 12 Приложения 2 СНиП 2.02.01-83\*.

$$E_{ГР} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_{zp,i} h_i}{W}; \quad m_{ГР} = \frac{\sum_{i=1}^n \nu_i h_i}{H_c} \quad (4)$$

### Расчет по схеме ЛПП в соответствии с СП 50-101-2004

На коэффициент  $\lambda$  и глубину  $H_c$  налагаются следующие ограничения:

- а) при  $b \leq 5$  -  $\lambda = 0.2$ , но  $H_c$  не менее  $b/2$ ;
- б) при  $5 < b \leq 10$  -  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но  $H_c$  не менее  $b/2$ ;
- в) при  $10 < b \leq 20$  -  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но  $H_c$  не менее  $(4 + 0.1 \cdot b)$ ;
- г) при  $20 < b$  -  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но  $H_c$  не менее  $(4 + 0.1 \cdot b)$ .

$b$  - меньшая сторона фундамента.

Коэффициент  $\lambda$  и предельные значения  $H_c$ .

| $b, \text{ м}$ | $\lambda$ | $H_c, \text{ м}$<br>не менее | $b, \text{ м}$ | $\lambda$ | $H_c, \text{ м}$<br>не менее |
|----------------|-----------|------------------------------|----------------|-----------|------------------------------|
| 1 - 5          | 0.2       | 2.5                          | 15             | 0.4       | 5.5                          |
| 6              | 0.22      | 3.0                          | 16             | 0.42      | 5.6                          |
| 7              | 0.24      | 3.5                          | 17             | 0.44      | 5.7                          |
| 8              | 0.26      | 4.0                          | 18             | 0.46      | 5.8                          |
| 9              | 0.28      | 4.5                          | 19             | 0.48      | 5.9                          |
| 10             | 0.3       | 5.0                          | 20             | 0.5       | 6.0                          |
| 11             | 0.32      | 5.1                          | 30             | 0.5       | 7.0                          |
| 12             | 0.34      | 5.2                          | 40             | 0.5       | 8.0                          |
| 13             | 0.36      | 5.3                          | 50             | 0.5       | 9.0                          |
| 14             | 0.38      | 5.4                          | 100            | 0.5       | 10.0                         |

Если  $H_c$  залегает в пределах слоя, у которого  $E \geq 10000 \text{ т/м}^2$ , то  $H_c$  принимается до кровли этого слоя. Если  $H_c$  находится в пределах или на кровле слоя, у которого  $E < 500 \text{ т/м}^2$ , то этот слой включают в сжимаемую толщу, а за  $H_c$  принимают меньшее из значений, соответствующих подошве этого слоя или глубине, где  $\sigma_{zp} = 0.1 \cdot \sigma_{zg}$ .

### Расчет по схеме ЛПП в соответствии с СП 22.13330.2011

Глубина  $H_c$  принимается при выполнении условия  $\sigma_{zp} = 0.5 \cdot \sigma_{zg}$ , но не менее:

- а) при  $b \leq 10 \text{ м}$  –  $H_c$  не менее  $b/2$ ;
- б) при  $10 < b \leq 60 \text{ м}$  –  $H_c$  не менее  $(4 + 0.1 \cdot b)$ ;
- в) при  $b > 60 \text{ м}$  –  $H_c$  не менее  $10 \text{ м}$ .

**b** – меньшая сторона фундамента.

| <b>b, м</b> | <b>λ</b> | <b>Hс, м</b><br>не менее | <b>b, м</b> | <b>λ</b> | <b>Hс, м</b><br>не менее |
|-------------|----------|--------------------------|-------------|----------|--------------------------|
| ≤10         | 0.5      | 5                        | 18          | 0.5      | 5.8                      |
| 11          | 0.5      | 5.1                      | 19          | 0.5      | 5.9                      |
| 12          | 0.5      | 5.2                      | 20          | 0.5      | 6.0                      |
| 13          | 0.5      | 5.3                      | 30          | 0.5      | 7.0                      |
| 14          | 0.5      | 5.4                      | 40          | 0.5      | 8.0                      |
| 15          | 0.5      | 5.5                      | 50          | 0.5      | 9.0                      |
| 16          | 0.5      | 5.6                      | ≥60         | 0.5      | 10.0                     |
| 17          | 0.5      | 5.7                      |             |          |                          |

При этом если **Hс** попадает в слой, у которого **E>10000т/м<sup>2</sup>**, то **Hс** принимается до кровли этого слоя. Если **Hс** попадает в слой, у которого **E≤700т/м<sup>2</sup>** или такой слой лежит ниже **Hс**, то расчет продолжается до выполнения условия  $\sigma_{zp} = 0.2 \cdot \sigma_{zg}$ .

### **Расчет по схеме ЛПП в соответствии с ДБН В.2.1-10:2009**

На коэффициент **λ** и глубину **Hс** налагаются следующие ограничения:

- а) при  $b \leq 5$  –  $\lambda = 0.2$ , но **Hс** не менее  $b/2$ ;
- б) при  $5 < b \leq 10$  –  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но **Hс** не менее  $b/2$ ;
- в) при  $10 < b \leq 20$  –  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но **Hс** не менее  $(4 + 0.1 \cdot b)$ ;
- г) при  $20 < b$  –  $\lambda = 0.02 \cdot b + 0.1$ , но **Hс** не менее  $(4 + 0.1 \cdot b)$ .

**b** – меньшая сторона фундамента.

| <b>b, м</b> | <b>λ</b> | <b>Hс, м</b><br>не менее | <b>b, м</b> | <b>λ</b> | <b>Hс, м</b><br>не менее |
|-------------|----------|--------------------------|-------------|----------|--------------------------|
| 1 – 5       | 0.2      | 2.5                      | 15          | 0.4      | 5.5                      |
| 6           | 0.22     | 3.0                      | 16          | 0.42     | 5.6                      |
| 7           | 0.24     | 3.5                      | 17          | 0.44     | 5.7                      |
| 8           | 0.26     | 4.0                      | 18          | 0.46     | 5.8                      |
| 9           | 0.28     | 4.5                      | 19          | 0.48     | 5.9                      |
| 10          | 0.3      | 5.0                      | 20          | 0.5      | 6.0                      |
| 11          | 0.32     | 5.1                      | 30          | 0.5      | 7.0                      |
| 12          | 0.34     | 5.2                      | 40          | 0.5      | 8.0                      |
| 13          | 0.36     | 5.3                      | 50          | 0.5      | 9.0                      |
| 14          | 0.38     | 5.4                      | 100         | 0.5      | 10.0                     |

Если **Hс** залегает в пределах слоя, у которого **E≥10000 т/м<sup>2</sup>**, то **Hс** принимается до кровли этого слоя. Если **Hс** находится в пределах или на кровле слоя, у которого **E<500 т/м<sup>2</sup>**, то этот слой включают в сжимаемую толщу, а за **Hс** принимают меньшее из значений, соответствующих подошве этого слоя или глубине, где  $\sigma_{zp} = 0.1 \cdot \sigma_{zg}$ .

4) Осадка вычисляется следующим образом:

$$W_1 = \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i}) h_i}{E_i};$$

$$W_2 = \sum_1^n \frac{\sigma_{zy,i} h_i}{E_{ei}} ;$$

$$W_3 = \sum_1^n \frac{\sigma_{zp,i} h_i}{E_{ei}} \quad (5)$$

где

$E_i$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви первичного нагружения;

$E_{ei}$  – модуль деформации  $i$ -го слоя грунта по ветви вторичного нагружения; по умолчанию  $E_{ei} = E_i$ ;

$\sigma_{zp,j}$  – напряжение в  $i$ -том слое грунта от внешней нагрузки;

$\sigma_{zy,j}$  – напряжение в  $i$ -том слое грунта от собственного веса.

Если собственный вес грунта на уровне подошвы больше среднего давления под подошвой, то  $W = W_3$ , иначе  $W = W_1 + W_2$ . Осадка вычисляется по формуле (2).

Для вычисления коэффициентов постели используются средние (в пределах зафиксированной глубины сжимаемой толщи  $H_c$ ) значения модуля деформации  $E_{ГР}$  и коэффициента Пуассона  $m_{ГР}$ , вычисленные аналогично формулам (4).

5) Вычисление коэффициента постели  $C_1$  производится тремя методами.

**Метод 1.** Коэффициент постели  $C_1$  вычисляется по усредненным значениям модуля деформации и коэффициента Пуассона грунта:

$$C_1 = \frac{E_{ГР}}{H_c (1 - 2m_{ГР}^2)} \quad (6)$$

**Метод 2.** Коэффициент постели  $C_1$  вычисляется по формуле Винклера:

$$C_1 = \frac{q}{S}, \quad (7)$$

где

$$q = \frac{P}{\eta * b^2}$$

– среднее давление под подошвой фундамента;

$b$  – размер меньшей стороны фундамента;

$\eta$  – отношение сторон фундамента;

$S$  – осадка основания.

**Метод 3.** Для определения коэффициента постели  $C_1$  так же как и в методе 1 используется формула (6). Отличие состоит в том, что для определения среднего модуля деформации вводится поправочный коэффициент  $u$  к величине модуля деформации  $i$ -го подслоя. Этот коэффициент изменяется от  $u_1 = 1$  на уровне подошвы фундамента до  $u_n = 12$  на уровне уже вычисленной границы сжимаемой толщи. Принято, что коэффициент  $u$  изменяется по закону квадратной параболы:

$$u = \frac{11z^2}{H_C^2} + 1 \quad (8)$$

Кроме того, принимается, что дополнительное вертикальное напряжение по глубине распределено равномерно. Тогда

$$E_{ГРЗ} = \frac{H_C}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{u_i E_i}} \quad (9)$$

Метод 3 предложен с целью устранить недостатки первых двух. Для метода 1 – это невозможность учесть нарастание модуля деформации грунта по глубине, что приводит к завышенным значениям осадок, а следовательно и заниженным значениям коэффициента постели  $C_1$ . Недостаток метода 2 заключается в том, что в местах резкого изменения величин приложенных нагрузок коэффициент постели  $C_1$  также испытывает резкий скачок, что противоречит здравому смыслу. Этот недостаток сохраняется даже при использовании нарастающего по глубине модуля деформации грунта.

6) Для всех методов коэффициент постели  $C_2$  вычисляется по формуле:

$$C_2 = \frac{C_1 H_C^2 (1 - 2m_{ГР}^2)}{6(1 + m_{ГР})} \quad (10)$$

### **Расчет по схеме ЛДС**

7) Определяется граница сжимаемой толщи  $H_{Л}$  для схемы ЛДС с учетом требований п.2.40 и пп. 7-8 Приложения 2 СНиП 2.02.01-83\*.

Если эти требования не удовлетворяются, то пользователю предлагается ответить на вопрос, желает ли он продолжить вычисления. Если да, то принимается  $H_{Л} = H_C$  и расчет продолжается, а иначе – прекращается.

8) Для вычисления коэффициентов постели по трем методам используются средние (с учетом слоев  $j=1 \sim n$  в пределах зафиксированной глубины сжимаемой толщи  $H_{Л}$ ) значения модуля деформации  $E_{ГР}$ ,  $E_{ГРЗ}$  и коэффициента Пуассона  $m_{ГР}$ .

Коэффициент  $u$  вычисляется по формуле (8).

$$E_{ГР} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_j - k_{j-1})}{\sum_{j=1}^n \frac{(k_j - k_{j-1})}{E_j}};$$

$$m_{ГР} = \frac{\sum_{j=1}^n v_j h_j}{H_{Л}};$$

$$E_{ГРЗ} = \frac{\sum_{j=1}^n (k_j - k_{j-1})}{\sum_{j=1}^n \frac{(k_j - k_{j-1})}{u_j E_j}} \quad (11)$$

9) Вычисляется осадка  $S$  по формуле 7 Приложения 2 СНиП 2.02.01-83\*.

10) Вычисляется коэффициент постели  $C_1$  тремя методами. Используются формула (6) с заменой  $H_c$  на  $H_l$  и формула (7). Коэффициент постели  $C_2$  вычисляется по формуле (10) с заменой  $H_c$  на  $H_l$ .

### Расчет по формуле О.А. Савинова

11) На основании заданных для каждого слоя грунта коэффициентов жесткости  $C_0$  и вычисленной границы сжимаемой толщи  $H_c$  производится вычисление усредненного коэффициента жесткости по формуле

$$C_{гр0} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{0i} h_i}{H_c} \quad (12)$$

12) Вычисляется коэффициент постели  $C_1$  по следующим формулам:  
для прямоугольного фундамента с размерами  $l \times b$

$$C_1 = C_0 \left( 1 + \frac{2(l+b)}{\Delta l b} \right) \sqrt{\frac{q}{p_0}} \quad (13)$$

для круглого фундамента с радиусом  $R$

$$C_1 = C_0 \left( 1 + \frac{2}{\Delta R} \right) \sqrt{\frac{q}{p_0}}, \quad (14)$$

где

$C_0$  – коэффициент жесткости, принимаемый по таблице;

$p_0$  – давление под опытным штампом, равное 2 т/м<sup>2</sup>;

$q$  – среднее давление под подошвой в т/м<sup>2</sup>;

$\Delta$  – константа упругости основания, равная единице в 1/м.

13) Коэффициент постели  $C_2$  вычисляется по формуле (10).

### Таблица коэффициентов жесткости

(Н.А. Цытович, Механика грунтов, с.358)

| № | Наименование грунта                                                                                                                                                                               | $C_0$ , тс/м <sup>3</sup>                |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | Пески:<br>1) пылеватые, очень влажные и насыщенные водой;<br>2) мелкие, независимо от плотности и влажности;<br>3) средней крупности, крупные и гравелистые, независимо от плотности и влажности. | 800 – 1000<br>1000 – 1200<br>1200 – 1600 |
| 2 | Глины, суглинки и супеси:<br>1) находящиеся в пластическом состоянии, близком к границе текучести;                                                                                                | 500 – 1000                               |

|                |        |
|----------------|--------|
| 2) пластичные; | 1000 – |
| 3) твердые.    | 2000   |
|                | 2000 – |
|                | 3000   |