

ХОРУНЖИЙ ВАДИМ ИВАНОВИЧ

Кандидат технических наук, инженер-строитель, выполняющий работы по обследованию и разработке проектной документации по реконструкции зданий в Государственном предприятии "Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций".

Основные направления научной деятельности: проектирование жилых, общественных и промышленных зданий и сооружений; натурные исследования зданий на подрабатываемых территориях; разработка нормативных документов по проектированию зданий в сложных условиях строительства (здания серий 179, 87, 96, К-134, Пластабу, здания из монолитного железобетона и др.); обследования и оценка технического состояния поврежденных конструкций и зданий; разработка рекомендаций и проектной документации по усилению конструкций реконструируемых зданий.

Автор более 70 печатных работ.

УДК 624.154

РАСЧЕТ ГИБКИХ ПОДПОРНЫХ СТЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОРМАТИВОВ СНиП 2.02.03-85 «СВАЙНЫЕ ФУНДАМЕНТЫ»

Ключевые слова: подпорные стенки, свайные фундаменты, СНиП

Рассматривается методика расчета свай, применяемых в подпорных стенках, с использованием нормативов, основанных на теории упругого основания с коэффициентом постели, нарастающим пропорционально глубине. Дан вывод дополнительных формул для расчетных схем свай, не рассмотренных в СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты».

Розглядається методика розрахунків паль, застосовуваних у підірних стінках, з використанням нормативів, заснованих на теорії пружної основи з коефіцієнтом постелі, що наростають пропорційно глибині. Даний вивід додаткових формул для розрахункових схем паль, не розглянутих у ДБН 2.02.03-85 «Пальові фундаменти».

Design procedure of the piles applied in retaining walls, with use of the specifications based on the theory of the elastic basis with factor of bed, accruing proportionally to depth is considered. The conclusion of additional formulas for settlement schemes of the piles which have been not considered in SNiP of 2.02.03-85 "Pile bases" is given.

Гибкие подпорные стенки с одним или несколькими ярусами анкеров представляют статически неопределимые системы, расчет которых не вызывает затруднений, если известны решения, определяющие перемещения и усилия в заглубленной части от горизонтальных сил и изгибающего момента. Метод расчета свай на указанные нагрузки, представленный в нормативных документах [1,2], основан на работах И.В. Урбана, К.С. Завриева, Г.С. Шпиро и др. [3,4]. Особенностью этого метода является использование полученного И.В.Урбаном решения следующего дифференциального уравнения 4-ой степени:

$$u_z^{IV} + \alpha^5 z u_z = 0, \text{ где } \alpha = \sqrt[5]{\frac{Kb}{EI}}; \tag{1}$$

α - коэффициент деформации; u_z - горизонтальное смещение; K - коэффициент пропорциональности, принимаемый в зависимости от вида грунта окружающего сваю; b - условная ширина сваи, принимаемая в соответствии с п.4 прил. 1 [1]; EI - жесткость сваи.

И.В.Урбан рассмотрел работу гибкой стенки в условиях плоской деформации как поло-сы, контактирующей с основанием Винклера в виде двух четвертьплоскостей, расположенных симметрично относительно оси стенки и с симметричными эпюрами коэффициентами постели, нарастающими пропорционально глубине. Решение уравнения (1) дано И.В. Урбаном в следующем виде:

$$u_z = u_0 A_1 - \psi_{0a} B_1 + M_{0a} C_1 + H_{0a} D_1; \tag{2}$$

$$\psi_{za} = u_0 A_2 - \psi_{0a} B_2 + M_{0a} C_2 + H_{0a} D_2; \tag{3}$$

$$M_{za} = u_0 A_3 - \psi_{0a} B_3 + M_{0a} C_3 + H_{0a} D_3; \tag{4}$$

$$H_{za} = u_0 A_4 - \psi_{0a} B_4 + M_{0a} C_4 + H_{0a} D_4, \tag{5}$$

где $\psi_{0a} = \psi_0/\alpha$; $M_{0a} = M_0/\alpha^2 EI$; $H_{0a} = H_0/\alpha^3 EI$;
 u_0 , ψ_0 , M_0 , H_0 – горизонтальное смещение, угол поворота, момент и поперечная сила в сечении $z = 0$ (начальные параметры); u_z , ψ_z , M_z , H_z – тоже в сечении на глубине z ;
 A_j , B_j , C_j , D_j ($j = 1, \dots, 4$) – функции влияния, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 - \frac{z_a^5}{5!} + 6 \cdot \frac{z_a^{10}}{10!} - 11 \cdot 6 \cdot \frac{z_a^{15}}{15!} + 16 \cdot 11 \cdot 6 \cdot \frac{z_a^{20}}{20!} - \dots; \\ B_1 &= z - 2 \cdot \frac{z_a^6}{6!} + 7 \cdot 2 \cdot \frac{z_a^{11}}{11!} - 12 \cdot 7 \cdot 2 \cdot \frac{z_a^{16}}{16!} + \dots; \\ C_1 &= \frac{z_a^2}{2!} - 3 \cdot \frac{z_a^7}{7!} + 8 \cdot 3 \cdot \frac{z_a^{13}}{13!} - 13 \cdot 8 \cdot 3 \cdot \frac{z_a^{17}}{17!} - \dots; \\ D_1 &= \frac{z_a^3}{3!} - 4 \cdot \frac{z_a^8}{8!} + 9 \cdot 4 \cdot \frac{z_a^{13}}{13!} - 14 \cdot 9 \cdot 4 \cdot \frac{z_a^{18}}{18!} - \dots \end{aligned} \quad (6)$$

Для получения значений A_2, A_3, A_4 необходимо выполнить последовательное дифференцирование. Аналогично определяются и другие функции. В уравнениях (6) принято $z_a = \alpha z$. Численные значения функций влияния при $z_a = 0, \dots, 4$ представлены в табл. 4 приложения 1 к СНиП 2.02.03-85 [1].

При использовании решения И.В.Урбана (2) в расчетах свай, применяемых в качестве подпорных стенок с анкерами и без них (рис.1, 2), возникает необходимость в решениях дополнительных задач, учитывающих особенности расчетных схем, не рассмотренных в указанных нормативных документах. К этим задачам, решения которых рассматриваются в статье, относятся:

- определение перемещений и усилий в заглубленной части стенки от горизонтальных сил и момента с учетом разных параметров эпюр коэффициентов постели на контакте с упругими четвертыпоскостями, смещенными относительно друг друга по вертикали на глубину котлована (рис.2, 3 в);
- определение дополнительных усилий и перемещений, вызванных перераспределением активных давлений в заглубленной части стенки при отрывке котлована (рис.2,3 г).

На рис.1 показаны расчетные схемы подпорных стенок с одноярусным расположением анкеров. Каждая из расчетных схем разделена на две части – верхнюю, расположенную выше дна котлована, и нижнюю, находящуюся в грунтовой массе. Простейшие схемы перераспределения активных давлений грунта при отрывке котлована показаны на рис.2. Расчетные схемы заглубленной части стенки показаны на рис.3.

При одноярусном расположении анкеров расчеты выполняют: при глубине котлована, необходимой для установки анкеров (1-ый этап); при натяжении анкеров (2-й этап); при отрывке котлована до проектной отметки (3-ий этап). Результаты указанных трех расчетов учитывают при определении напряженно-деформированного состояния стенки в стадии ее эксплуатации.

Формулы и таблицы, представленные в нормативных документах [1,2] позволяют выполнять расчеты при проектной отметке котлована, если стенка не закреплена в грунте (схема Якоби). При расчетах свободно стоящих, а также заанкеренных стенок, работающих по схеме Блюма-Ломейера (полное или частичное защемление в грунте), необходимо учитывать дополнительные условия, указанные выше. При этом во всех случаях следует учитывать дополнительные перемещения и усилия вызванные перераспределением грунтовых нагрузок в заглубленной части стенки при отрывке котлована (рис. 2).

Перемещения и усилия в сечениях заглубленной части стенки на участке ob (рис. 3в) определяются по формулам (2)

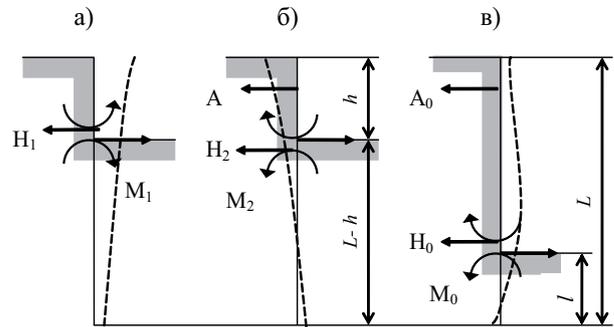


Рис. 1 Расчетные схемы подпорной стенки: а - при промежуточной отметке котлована до натяжения анкеров, б - при натяжении анкеров, в - при проектной отметке котлована

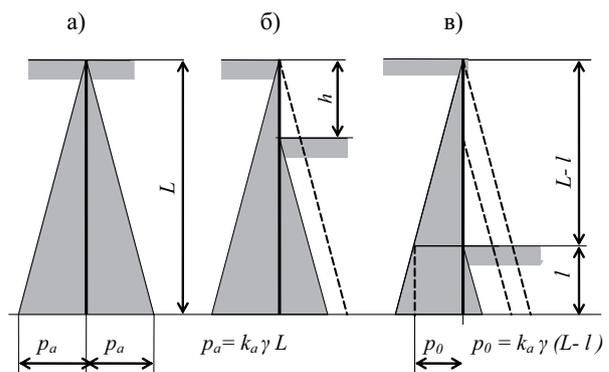


Рис. 2 Простейшие схемы перераспределения активных нагрузок: а - при промежуточной отметке котлована до натяжения анкеров, б - при натяжении анкеров, в - при проектной отметке котлована

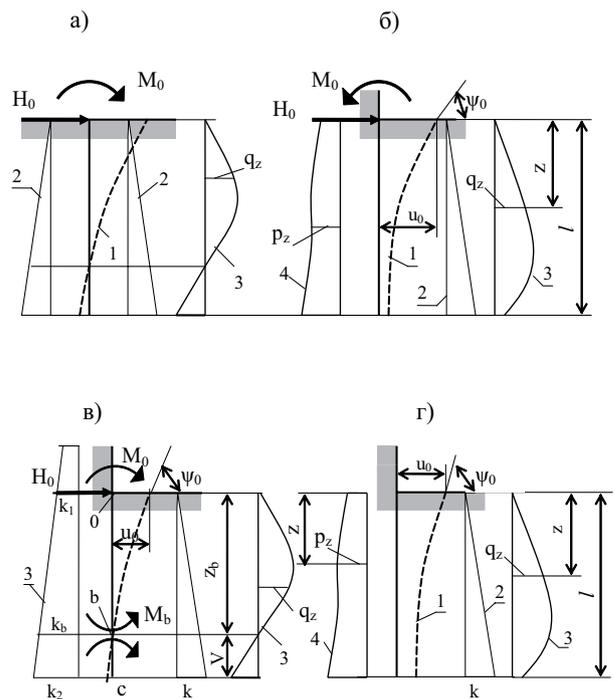


Рис. 3 Расчетные схемы заглубленной части гибких стенок: а – по СНиП 2.02.03-85, б - при отсутствии защемления в грунте (схема Якоби), в - при полном или частичном защемлении в грунте (схема Блюма-Ломейера), г - при грунтовой нагрузке p_z , 1 – деформированная ось стенки; 2 - эпюры коэффициентов постели, 3 - эпюры давлений на грунт, 4 - грунтовая нагрузка.

- (5) В рассматриваемой задаче указанные формулы содержат неизвестные u_0, ψ_0, z_b , которые определяются из следующих условий в сечении b :

$$u_b = 0; M_{b0} = M_{bc}; H_{b0} = H_{bc} \quad (7, 8, 9)$$

где M_{b0} и H_{b0} - момент и поперечная сила от нагрузок на участке $b0$; M_{bc} и H_{bc} - то же от нагрузок на участке bc .

M_{b0} и H_{b0} - определяются по формулам (4) и (5). Для определения M_{bc} и H_{bc} рассмотрим участок bc относительно местных осей v и u_b (рис. 3в). Как правило, приведенная длина рассматриваемого участка в проектируемых подпорных стенках $\alpha lbc < 2$, что позволяет в расчетах принимать его бесконечно жестким. В соответствии с обозначениями на рис. 3в, имеем:

$$u_v = \psi_b v; k_v = k_b + (k_2 - k_1) v / l; \quad (10)$$

$$q_v = \psi_b [(k_b v + (k_2 - k_1) v^2) / l]; \quad (11)$$

$$H_{bc} = \int_0^l q_v dv = \psi_b V^2 (k_v + 2 k_2) / 6; \quad (12)$$

$$M_{bc} = \int_0^l q_v v dv = \psi_b V^3 (k_v + 3 k_2) / 12. \quad (13)$$

При начале координат в сечении 0 имеем: $V = l - z_b$ и $k_v = (k_2 - k_1) z_b / l$. В этом случае выражения (12) и (13) относительно осей u и z получают вид:

$$H_{bc} = \psi_b (l - z_b)^2 [k_1 + 2 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 6; \quad (12a)$$

$$M_{bc} = \psi_b (l - z_b)^3 [k_1 + 3 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 12. \quad (13a)$$

На основании (2) - (5), (12a), (13a) уравнения (7) - (9), определяющие неизвестные u_0, ψ_0 и z_b получают следующий вид:

$$u_0 A_1 - \psi_0 B_1 / \alpha + M_0 C_1 / \alpha^2 EI + H_0 D_1 / \alpha^3 EI = 0; \quad (7a)$$

$$\alpha EI (u_0 A_3 - \psi_0 B_3 / \alpha + M_0 C_3 / \alpha^2 EI + H_0 D_3 / \alpha^3 EI) = F_M (u_0 A_2 - \psi_0 B_2 / \alpha + M_0 C_2 / \alpha^2 EI + H_0 D_2 / \alpha^3 EI); \quad (8a)$$

$$\alpha^2 EI (u_0 A_4 - \psi_0 B_4 / \alpha + M_0 C_4 / \alpha^2 EI + H_0 D_4 / \alpha^3 EI) = F_H (u_0 A_2 - \psi_0 B_2 / \alpha + M_0 C_4 / \alpha^2 EI + H_0 D_4 / \alpha^3 EI), \quad (9a)$$

где $F_M = (l - z_b)^3 [k_1 + 3 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 12;$
 $F_H = (l - z_b)^2 [k_1 + 2 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 6.$

Выполненные исследования [4] показали, что при $\alpha l < 2$ можно принимать жесткость всей заглубленной части стенки бесконечно большой и рассматривать ее перемещение как жесткого тела. В этом случае представленные выше формулы существенно упрощаются. В соответствии с принятыми обозначениями (рис. 3в) перемещения и усилия в сечениях заглубленной части стенки определяются по формулам:

в сечениях $0 < z < z_b$

$$u_z = u_0 - \psi_0 z; \psi_0 = u_0 / z_b; q_z = k (u_0 z - \psi_0 z^2) / l; \quad (14)$$

$$H_z = H_0 - k (u_0 z^2 / 2 - \psi_0 z^3 / 3) / l; \quad (15)$$

$$M_z = M_0 + H_0 z - k (u_0 z^3 / 6 - \psi_0 z^4 / 12) / l; \quad (16)$$

в сечении $z = z_b$

$$u_b = 0; p_l = 0;$$

$$H_{b0} = H_0 - k u_0 z_b^2 / 6 l; M_{b0} = M_0 + H_0 z_b - k u_0 z_b^3 / 12 l. \quad (17, 18)$$

Уравнения (14) - (18) содержат неизвестные u_0 и z_b , которые определяются с учетом условий (7) - (9). Рассматривая (8), (13a) и (18), получим

$$\psi_0 (l - z_b)^3 [k_1 + 3 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 12 l - M_0 - H_0 z_b + k u_0 z_b^3 / 12 l = 0. \quad (19)$$

На основании (9), (12a) и (17) получаем второе уравнение для определения указанных неизвестных

$$\psi_0 (l - z_b)^2 [k_1 + 2 k_2 + (k_2 - k_1) z_b / l] / 6 l + H_0 z_b - k u_0 z_b^2 / 6 l = 0. \quad (20)$$

Расчетная схема, учитывающая перераспределение активных грунтовых нагрузок в заглубленной части подпорной стенки при отрывке котлована, показана на рис. 3 г. В простейшем случае при равномерно распределенной нагрузке p перемещения и усилия определяются по формулам:

$$u_z = u_{0p} - \psi_{0p} z; k_z = k z / l; q_{zp} = k (u_{0p} z - \psi_{0p} z^2) / l. \quad (21)$$

$$H_{zp} = p z - k (3 u_{0p} z^2 - 2 \psi_{0p} z^3) / 6 l; \quad (22)$$

$$M_{zp} = p z^2 / 2 - k (2 u_{0p} z^3 - \psi_{0p} z^4) / 12 l. \quad (23)$$

Из уравнений (21) - (23) при $z = l$ получаем формулы для определения начальных параметров:

$$u_{0p} = 6p/k; \psi_{0p} = 6p/kl.$$

Представленные в статье формулы, внесенные в таблицы программы Excel, позволяют мгновенно получать результаты расчетов в виде таблиц и графиков. Рассматриваемые задачи решаются также методом последовательных приближений с использованием известных программ Лири, SCAD и др. Последовательными приближениями определяется сечение с координатой z_b (рис.3в), которое является границей, разделяющей участки заглубленной части стенки с разными параметрами эпюр коэффициентов постели. Приемлемые результаты расчетов подпорных стенок зависят не только от применяемых методов, но и от достоверности исходных данных, определяющих грунтовые нагрузки. В течение последних десятилетий проводились многочисленные опытные исследования с целью уточнения или совершенствования методов расчета подпорных стенок. На основании этих исследований в технической литературе [5,6,7] и др. представлены уточняющие коэффициенты для грунтовых нагрузок, устанавливаемых в зависимости от перемещений подпорных стенок и грунтовых условий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. СНиП 2.02.03.-85. Свайные фундаменты. - М.: Стройиздат, 1986.
2. Руководство по проектированию свайных фундаментов. // НИИ оснований и подземных сооружений. - М.: Стройиздат, 1980. - 152 с.
3. Урбан И.В. Расчет тонких стенок с учетом упругих свойств грунта и стенки. // Труды МИИТ, вып. 55. - М.: Трансжелдориздат, 1939.
4. Завриев К.С., Шпиро Т.С. Расчеты фундаментов глубокого заложения. -М.: «Транс-порт», 1970. - 216 с.
5. Чеботарев Г. П. Механика грунтов и земляные сооружения. - М.: Изд. литературы по строительству, 1968. - 616 с.
6. Дуброва Г. А. Взаимодействие грунта и сооружения. - М.: «Речной транспорт», 1963. - 220 с.
7. Перлей Е.М., Раюк В.Ф. и др. Свайные фундаменты и заглубленные сооружения. - Л.: Стройиздат, 1989. - 177 с.