

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ ДЛИНЫ ШПУНТА ОДНОАНКЕРНЫХ ТОНКИХ СТЕНОК ПРИЧАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Школа Ю.А., к.т.н., доц.

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Одной из распространенных конструкций морских причальных гидротехнических сооружений являются тонкие стенки (больверки). Расширение сортамента применяемых профилей шпунта (в том числе комбинированного) при увеличении погонной жесткости спектр возможных глубин у кордона причалов с конструктивным решением в виде тонкой стенки значительно расширился. Поэтому одноанкерные больверки остаются актуальной конструкцией в глубоководных портах. Существующие в настоящее время в СНГ нормативные методы расчета лицевой стенки больверка [1] являются графоаналитическими и трудоемкими, что не отвечает современным требованиям к методам расчета строительных конструкций.

Одной из локальных задач на пути совершенствования расчета тонких стенок является разработка способа определения глубины погружения шпунта без выполнения графических построений.

Характер работы одноанкерной гибкой стенки с некоторыми допущениями можно представить как работу статически определимой балки, свободно опертой в месте крепления анкера и в точке приложения равнодействующей пассивного сопротивления грунта со стороны засыпки (рис.1). При этом, минимальная глубина погружения грунта определяется из условия равенства величин экстремальных изгибающих моментов  $|M_{\max}| = |M_{\min}|$  (схема Блюма-Ломейера).

Распределенную нагрузку на тонкую стенку представляют в виде кусочно-линейной функции  $q(y)$ . Значения параметров распределенной нагрузки в начале  $q_{i1}$  и в конце  $q_{i2}$  элементарного интервала нагрузки, а также длины интервалов  $l_i$  определены. При этом, удобно принять правило знаков, по которому параметры  $q_{i1}$  и  $q_{i2}$  считаются положительными при их направлении, соответствующем направлению активного давления грунта, и отрицательными при их обратном направлении.

При анализе статической стороны задачи, очевидно, что аналитическое решение задачи определения длины шпунтовой стенки из условия равенства экстремальных изгибающих моментов в случае представления нагрузки в виде кусочно-линейной функции возможно только в случае, если известен интервал нагрузки, в котором находится экстремум. Однако, при многослойном геологическом разрезе достоверно найти интервал не представляется возможным. Таким образом, для возможности найти приближенное аналитическое решение необходимо представить нагрузку на тонкую стенку в виде непрерывной функции.

Аппроксимация нагрузки может быть выполнена при условии сглаживания «скачков», путем осреднения значения нагрузки на границе интервалов. В нижнем сечении  $i$ -го интервала нагрузки осредненное значение можно найти по формуле:

$$q_i = 0,5(q_{i,2} + q_{i+1,1}) \quad (1)$$

Таким образом, получим нагрузку, при которой каждому значению вертикальной координаты соответствует одно значение нагрузки. Физическая суть подобной модификации нагрузки заключается в том, что на границе принятых в расчете слоев выделяется пограничный слой мощностью равной шагу разбивки. Физико-механические характеристики пограничного слоя имеют промежуточные значения (средние) между принятыми в расчете слоями.

Представление функции нагрузки возможно в виде степенного полинома

$$g(y) = a_n y^n + a_{n-1} y^{n-1} + a_{n-2} y^{n-2} + \dots + a_1 y + a_0 = \sum_{i=0}^n a_i y^i \quad (2)$$

Выбор степени полинома зависит от характера кривой нагрузки и необходимой точности расчета. Аппроксимация может выполняться методом наименьших квадратов.

Исходя из условий равновесия, выражения для опорных реакций условной балки:

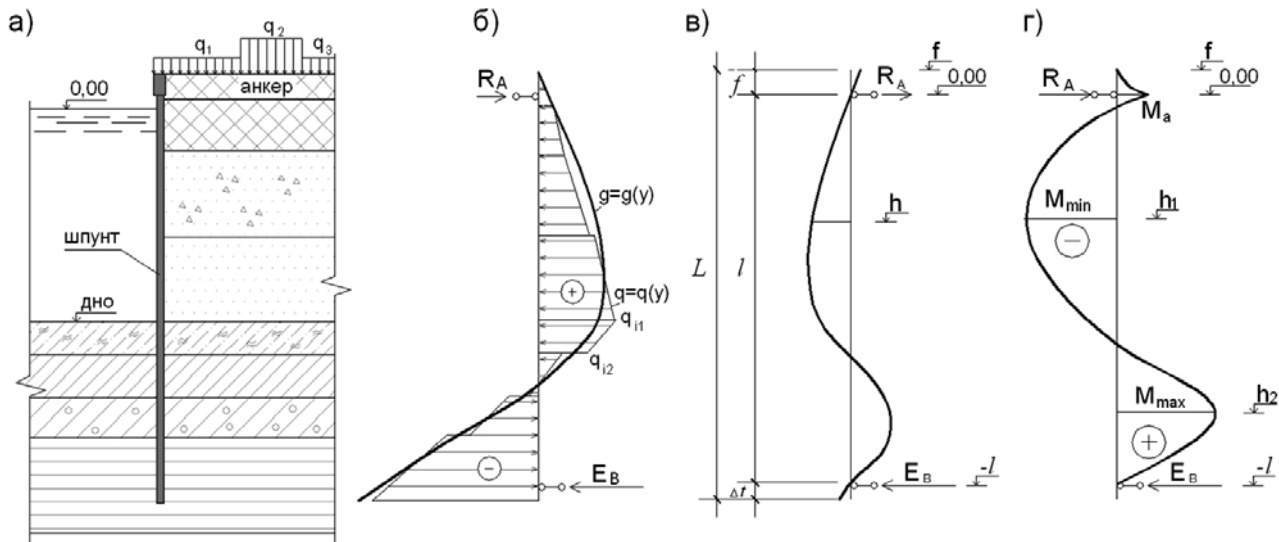


Рис. 1. Расчетная схема одноанкерной тонкой стенки причального сооружения.

- схема поперечного разреза одноанкерного больверка;
- кусочно-линейная  $q(y)$  и аппроксимированная функция нагрузки  $g(y)$  на тонкую стенку;
- деформированная схема одноанкерной тонкой стенки;
- эпюра изгибающих моментов в расчетной схеме тонкой стенки.

- соответствующей усилию в анкере

$$R_A = \frac{1}{l} \int_{-l}^f (l+y) \cdot g(y) dy = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{f^{i-1}}{i-1} + A, \quad (3)$$

где

$$A = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{(-l)^i + (i-l)f^i}{i(i-l) \cdot l}; \quad (4)$$

- соответствующей равнодействующей обратного отпора грунта

$$E_B = \frac{1}{l} \int_{-l}^f y \cdot g(y) dy = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{(-l)^i + f^i}{i \cdot l}. \quad (5)$$

Поперечная сила и изгибающий момент в произвольном сечении при  $y = h$ :

$$Q(h) = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{h^{i-1}}{i-1} + A, \quad (6)$$

$$M(h) = \int_{-l}^h Q(y) dy = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{h^i}{i(i-1)} + Ah + C. \quad (7)$$

Значение постоянной  $C$  может быть найдено из условия  $M(-l) = 0$ . Тогда из (7)

$$C = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{f^i}{i}. \quad (8)$$

Координаты экстремумов моментов можно найти из уравнения  $Q(h) = 0$ . При этом, учитывая возможную работу конструкции, действительных корней уравнения имеется два  $h_1$  и  $h_2$ . Чтобы получить разрешающую систему уравнений для координат  $h_1$  и  $h_2$ , можно воспользоваться условием проведения замыкающего луча графоаналитического метода расчета тонких стенок, согласно которому максимальное и минимальное значения изгибающих моментов, возникающих в экстремальных сечениях, равны между собой по модулю и противоположны по знаку:

$$M(h_1) = -M(h_2). \quad (9)$$

Для удобства дальнейших преобразований, учитывая (6), выражение (7) приводим к виду:

$$M(h) = h \cdot Q(h) - \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{h^i}{i} + C. \quad (10)$$

Тогда, учитывая, что  $Q(h_1) = 0$  и  $Q(h_2) = 0$ , выражение (9) преобразуется к виду:

$$\sum_{i=2}^{n+2} \frac{a_{i-2}}{i} (h_1^i + h_2^i) - 2 \cdot C = 0. \quad (11)$$

Второе уравнение системы разрешающих уравнений можно получить, рассматривая условие  $Q(h_1) = Q(h_2)$ , которое, учитывая (6), запишется в виде:

$$\sum_{i=2}^{n+2} \frac{a_{i-2}}{i-1} (h_1^{i-1} - h_2^{i-1}) = 0. \quad (12)$$

Уравнения (11) и (12) образуют систему нелинейных разрешающих уравнений для координат экстремумов  $h_1$  и  $h_2$ , которую возможно решить методом простой итерации [2].

Вводя обозначения

$$\begin{aligned} F_1(h_1, h_2) &= \sum_{i=2}^{n+2} \frac{a_{i-2}}{i} (h_1^i + h_2^i) - 2 \cdot C, \\ F_2(h_1, h_2) &= \sum_{i=2}^{n+2} \frac{a_{i-2}}{i-1} (h_1^{i-1} - h_2^{i-1}), \end{aligned} \quad (13)$$

приводим систему уравнений к виду:

$$\begin{cases} h_1 = \varphi_1(h_1, h_2) \\ h_2 = \varphi_2(h_1, h_2) \end{cases}, \quad (14)$$

где  $\varphi_1(h_1, h_2)$ ,  $\varphi_2(h_1, h_2)$  - итерирующие функции

$$\varphi_1(h_1, h_2) = h_1 + \alpha \cdot F_1(h_1, h_2) + \beta \cdot F_2(h_1, h_2), \quad (15)$$

$$\varphi_2(h_1, h_2) = h_2 + \gamma \cdot F_1(h_1, h_2) + \delta \cdot F_2(h_1, h_2). \quad (16)$$

Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  могут быть найдены как приближенные решения системы 4-х уравнений [2]. В рассматриваемой задаче:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{K_4}{K_2 K_3 - K_4 K_1}, & \beta &= \frac{-K_3}{K_2 K_3 - K_4 K_1}, \\ \gamma &= \frac{-K_2}{K_2 K_3 - K_4 K_1}, & \delta &= \frac{K_1}{K_2 K_3 - K_4 K_1}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $K_1 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} h_{01}^{i-1}$ ,  $K_2 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} h_{01}^{i-2}$ ,

$$K_3 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} h_{02}^{i-1}, \quad K_4 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} h_{02}^{i-2};$$

$h_{01}$ ,  $h_{02}$  - начальное приближение координат экстремальных сечений (возможные значения  $h_{01} = -0,25t$ ,  $h_{02} = -0,75t$ ,  $t$  - общая мощность заданных слоев грунта).

Алгоритм решения системы (14) задается формулами:

$$\begin{cases} h_{1,n+1} = \varphi_1(h_{1,n}, h_{2,n}) \\ h_{2,n+1} = \varphi_2(h_{1,n}, h_{2,n}) \end{cases}, (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (18)$$

Итерации выполняются до тех пор, пока точность определения значений  $h_1, h_2$  будет менее заданной величины.

Определение длины шпунта сводится к решению одного из уравнений:

$$Q(h_1) = 0 \quad \text{либо} \quad Q(h_2) = 0, \quad (19)$$

в которых искомым значение является длина шпунта  $l$  между точкой крепления анкера  $A$  и точкой приложения равнодействующей обратного отпора грунта  $B$  (рис. 1).

Получаемые при решении уравнений (19) два значения длины  $l_1$  и  $l_2$  определяют точность вычисления  $l$ .

Учитывая выражения (6) и (4), уравнения (19) преобразовываются к виду:

$$\sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{(-l)^i}{i(i-1)} + D \cdot l + C = 0, \quad (20)$$

где  $D = D_1 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{h_1^{i-1}}{i-1}$  для  $l_1$ ;  $D = D_2 = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{h_2^{i-1}}{i-1}$  для  $l_2$ .

$$(21)$$

Уравнение решается методом итераций [2].

Вводим обозначение

$$F_3(l) = \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{(-l)^i}{i(i-1)} + D \cdot l + C. \quad (22)$$

Тогда

$$\frac{dF_3(l)}{dl} = - \sum_{i=2}^{n+2} a_{i-2} \frac{(-l)^{i-1}}{i-1} + D. \quad (23)$$

Решение уравнения (20) задается формулой:

$$l_{n+1} = l_n - F_3(l_n) \cdot \left[ \frac{dF_3(l_n)}{dl} \right]^{-1} \quad (24)$$

При этом, начальное приближение принимается равным общей толщине заданных слоев грунта суммарной эпюры нагрузок:  $l_0 = t$ . Окончательное значение длины  $l$  может быть получено как среднее значение из  $l_1$  и  $l_2$ .

Окончательно, необходимая длина шпунта:

$$L = t + \Delta t = l + f + \Delta t, \quad (25)$$

где  $\Delta t$  - дополнительная глубина, определяемая в соответствии с [1].

**Заключение.** Представлен способ приближенного определения необходимой длины шпунта при проектировании одноанкерных обычных больверков, который не требует графических построений и может быть достаточно просто реализован в среде EXCEL. Численная реализация предложенного алгоритма показала его достаточную точность и простоту в исполнении.

### **Summary**

**The approximate way of determination of necessary length of the sheet pile is given at design of one-anchor usual bolverks which doesn't require graphic constructions**

### ***Литература***

1. РД 31.31.27-81. Руководство по проектированию морских причальных сооружений. М., В/О «Мортехинформреклама», 1984. – 400 с.
2. Копченова Н.В., Марон И.А. Вычислительная математика в примерах и задачах. Главная редакция физико-механической литературы изд-ва «Наука», М, 1972. -368 с.
3. Кульмач П.П., Филиппенко В.З., Заритовский Н.Г. Морские гидротехнические сооружения. Ч. II: Причальные, шельфовые и берегоукрепительные сооружения / ЛВВИСУ. – Л., 1991. – 391 с.