

УДК 624.152.634

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-141-157

РАСЧЕТ ПОДПОРНОЙ ШПУНТОВОЙ СТЕНКИ ДЛЯ НЕОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ С НЕИЗВЕСТНОЙ ТОЧКОЙ ВРАЩЕНИЯ

В. П. Дыба, С. Г. Чутченко, М. П. Матвиенко

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. Приведен расчет подпорной шпунтовой стенки для неоднородного основания с неизвестной точкой вращения. Этот расчет применялся при реконструкции путепровода под железнодорожными путями по ул. Чайковского в городе Курске. Нормативный расчет ведется с рядом допущений, которые снижают его точность и увеличивают запас. Для увеличения точности расчета и уменьшения запаса за счет отказа от некоторых допущений разработан метод расчета, ведущийся относительно неизвестной точки вращения шпунтовой стенки. В нормативных документах принимается допущение, что эта точка является нижней точкой шпунтового ограждения. Отказ от данного допущения приводит к необходимости решения двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными, что значительно усложняет расчет, но позволяет более точно отразить реальные условия работы шпунтовой стенки, снизить запас, повысив тем самым экономический эффект.

Ключевые слова: подпорная шпунтовая стенка, неизвестная точка вращения, неоднородное основание, максимальный изгибающий момент

CALCULATION OF A RETAINING SHEET PILE WALL FOR A NON-UNIFORM BASE WITH AN UNKNOWN ROTATION POINT

V. P. Dyba, S. G. Chutchenko, M. P. Matvienko

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Annotation. This paper presents the calculation of a retaining sheet pile wall for a non-uniform base with an unknown rotation point. This calculation was used during the reconstruction of an overpass under the railway tracks on Tchaikovsky Street in Kursk. The standard calculation is based on a number of assumptions that reduce its accuracy and increase the safety margin. To improve the accuracy of the calculation and reduce the safety margin by eliminating certain assumptions, a calculation method was developed based on the unknown pivot point of the sheet pile wall. Standard documents assume that this point is the lowest point of the sheet pile enclosure. Discarding this assumption necessitates solving two nonlinear equations with two unknowns, which significantly complicates the calculation but allows for a more accurate reflection of the actual operating conditions of the sheet pile wall, reduces the safety margin, and thereby improves the economic efficiency.

Keywords: retaining sheet pile wall, unknown rotation point, non-uniform base, maximum bending moment

Введение

Для увеличения пропускной способности существующего тоннеля возникла необходимость в строительстве путепровода под железной дорогой по ул. Чайковского в г. Курске. В процессе строительства возникла необходимость укрепления откосов котлована подпорными стенами, т. к. железнодорожные пути, по которым ходили составы поездов, проходили очень близко от кромки котлована и была опасность обрушения.

Для этого необходимо было запроектировать и рассчитать подпорную стену. Был предложен новый метод расчета подпорной шпунтовой стены с неизвестной точкой вращения. Который позволяет более точно отразить реальные условия работы шпунтовой стенки, снизить запас, повысив тем самым экономический эффект.

Выбор вида и конструкции подпорных стен надлежит производить на основании технико-экономического сравнения вариантов, с учетом конструктивных решений и методов производства работ.

При проектировании подпорных стен следует рассматривать целесообразность использования пригрузки на поверхность обратной засыпки и нагрузок строительного периода для уплотнения засыпки и основания, упора в соседнее сооружение, конструкции стен с обратным уклоном основания, подсыпки из крупнозернистого грунта для уменьшения высоты стен, разгрузочных и экранирующих устройств (каменные призмы, свайные экраны и др.), различных способов укрепления грунта основания или его частичной замены, дополнительных конструктивных элементов, повышающих устойчивость (анкеровка в обратную засыпку, устройство зубьев, упоров, армирование грунта обратной засыпки и т. п.). Конструкции подпорных стен и основания следует рассчитывать по методу предельных состояний. Расчеты должны производиться по двум группам предельных состояний:

- по первой группе (полная непригодность сооружений, их конструкций и оснований к эксплуатации) — расчеты общей прочности и устойчивости системы сооружение-основание;

- по второй группе (непригодность к нормальной эксплуатации) — расчеты оснований на местную прочность, расчеты по ограничению перемещений и деформаций; по образованию или раскрытию трещин.

При расчете следует учитывать совместную работу сооружения с грунтом основания и засыпкой. Боковое давление грунта засыпки при этом необходимо определять с учетом прочностных и деформационных характеристик грунта и ограждающей конструкции, условий на контакте грунта и сооружения, последовательности и характера нагружения системы сооружение-основание, изменений уровней воды, изменений температуры окружающей среды, влияния соседних сооружений.

Как правило, следует учитывать нелинейность и неоднозначность связи между напряжениями и деформациями в грунте, а для особо ответственных сооружений — зависимость этой связи от последовательности и характера нагружения и необратимости деформаций.

Расчет системы сооружение-основание допускается производить приближенными методами, в которых боковое давление грунта определяют, как сумму основного и дополнительного (реактивного) давлений, действующих на расчетную плоскость сооружения или засыпки.

При расчетах тонкостенных конструкций (шпунтовых и др.) боковое давление грунта допускается определять, принимая грунт в состоянии предельного равновесия (на тыловую грань — активное, на лицевую — пассивное).

Влияние деформаций и других факторов учитывается путем введения (к расчетным значениям давления грунта или изгибающих моментов, анкерных реакций и заглубления шпунта) коэффициентов условий работы, устанавливаемых по нормам проектирования отдельных конструкций.

Боковое давление грунта в состоянии предельного равновесия, соответствующее стадии образования поверхности обрушения (активное давление) или поверхности выпора (пассивное давление), следует, как правило, определять с учетом трения по расчетной плоскости.

При этом необходимо рассматривать возможность образования поверхности обрушения и выпора по профилю откоса котлована или другой возможной ослабленной поверхности.

На стоимость шпунтового ограждения в значительной мере влияют его сечение и глубина заложения. Многочисленные исследования проводятся в области совершенствования расчетов и конструктивных решений шпунтовых ограждений для уменьшения их стоимости среди которых следует отметить работы Р. А. Мангушева [1–3], А. И. Полищука [4], В. В. Знаменского [5], М. Г. Зарецкого [6], В. В. Конюшкова [7] и В. В. Тютерева [8].

Расчет шпунтовой стенки для неоднородного основания с фиксированной точкой вращения

Физико-механические свойства грунтов

По результатам выполненных инженерно-геологических изысканий толща грунтов оснований проектируемого сооружения до разведанной глубины 5,0 м является неоднородной, в её пределах 2 инженерно-геологических элемента.

ИГЭ-1 Насыпной грунт — суглинок, песок, кварциты, уголь, обломки кирпича.

ИГЭ-2 Песок средней крупности, средней плотности, водонасыщенный.

Расчетные значения характеристик грунтов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические свойства грунтов

№	Вид грунта	Мощность слоя, м	Плотность, г/см ³			n, %	e	Влажность			J_p	J_L	S_r	E , МПа	c , кПа	φ , град
			ρ	ρ_s	ρ_d			W	W_L	W_p						
ИГЭ-1	Насыпной грунт – суглинок, песок, кварциты, обломки кирпича, уголь	1,6-3	1,95	2,66	1,71	35,69	0,555	0,14	0,21	0,15	0,06	-0,17		2,1	7	22
ИГЭ-2	Песок средней крупности, средней плотности, водонасыщенный	2-3,4	1,92	2,65	1,62	38,76	0,633	0,16					0,670	25	1	32

Подземные воды, встречены в скважинах на глубине 2,0–2,20 м, что соответствует, абсолютным отметкам 160,10–161,30 м. Подземные воды имеют гидравлическую связь с водами р. Тускарь и неагрессивны по всем показателям. Водовмещающими грунтами являются пески средней крупности (ИГЭ-2). Водупор до глубины 5,0 м не вскрыт. В осенне-зимний период, а также в период обильных продолжительных дождей возможно повышение уровня грунтовых вод на 1,5–2,0 м.

Нормативная глубина промерзания грунтов 1,2 м.

Расчет нагрузки от подвижного состава железных дорог

Согласно п. 5.10 справочного пособия «Проектирование подпорных стен и стен подвалов» к СНиП 2.09.03-85[3] интенсивность горизонтального давления грунта от равномерно распределенной нагрузки q , расположенной на поверхности призмы обрушения, следует определять по формулам:

– при сплошном и фиксированном расположении нагрузки (рис. 1, а)

$$P_q = q \gamma_f \lambda;$$

– при полосовом расположении нагрузки (рис. 1, б)

$$P_q = q \gamma_f \lambda / (1 + 2 \operatorname{tg} \theta_0 y_a / b_0),$$

где ε — угол наклона расчетной плоскости к вертикали, $\varepsilon = 0$; θ_0 — угол наклона плоскости скольжения к вертикали, $\theta_0 = 45^\circ - \varphi/2$; λ — коэффициент горизонтального давления грунта, $\lambda = g^2 \theta_0$; γ_f — коэффициент надежности по нагрузке, для подвижного состава железных дорог $\gamma_f = 1,2$.

Расстояние от поверхности грунта засыпки до начала эпюры интенсивности давления грунта от нагрузки y_a , определяется выражением $y_a = a / (\operatorname{tg} \theta_0 + \operatorname{tg} \varepsilon)$.

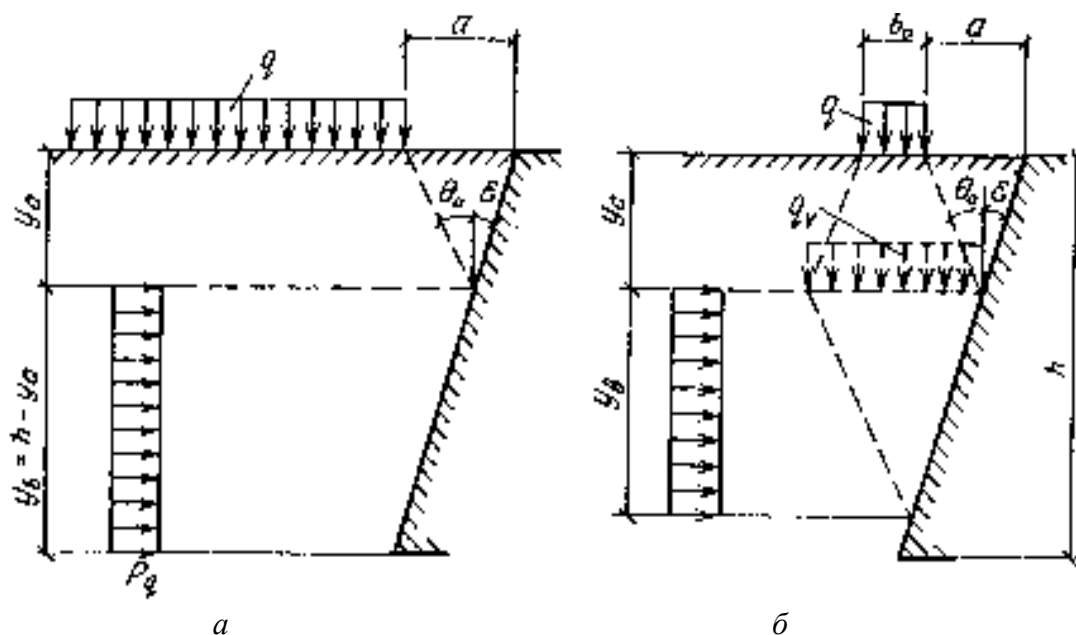


Рис. 1. Схема давления грунта:

a – от фиксированной нагрузки; *б* – от полосовой нагрузки

Протяженность эпюры интенсивности давления грунта по высоте y_b при фиксированной нагрузке (см. рис. 1, *a*) принимается равной $y_b = h - y_a$.

При полосовой нагрузке (см. рис. 1, *б*) протяженность эпюры давления по высоте $y_b = (b_0 + 2\text{tg}\theta_0 y_a) / (\text{tg}\varepsilon + \text{tg}\theta_0)$, но принимается не более величины $y_b \leq h - y_a$.

Вычисление величины глубины забивки шпунта

Результирующая активного давления грунта на шпунтовую стенку определяется по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma_1 \cdot (H + h)^2}{2} \cdot \xi_a;$$

где γ_1 — плотность грунта ИГЭ-1; H — высота подпора грунта; h — глубина забивки шпунта; ξ_a — коэффициент активного давления грунта, $\xi_a = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$.

Плечо момента активного давления грунта:

$$r_a = \frac{H + h}{3}.$$

Результирующая пассивного давления грунта на шпунтовую стенку определяется по формуле:

$$E_n = \frac{\gamma_2 \cdot h^2}{2} \cdot \xi_n;$$

где γ_2 — плотность грунта ИГЭ-2; ξ_n — коэффициент пассивного давления грунта, $\xi_n = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$.

Плечо момента пассивного давления грунта:

$$r_n = \frac{h}{3}.$$

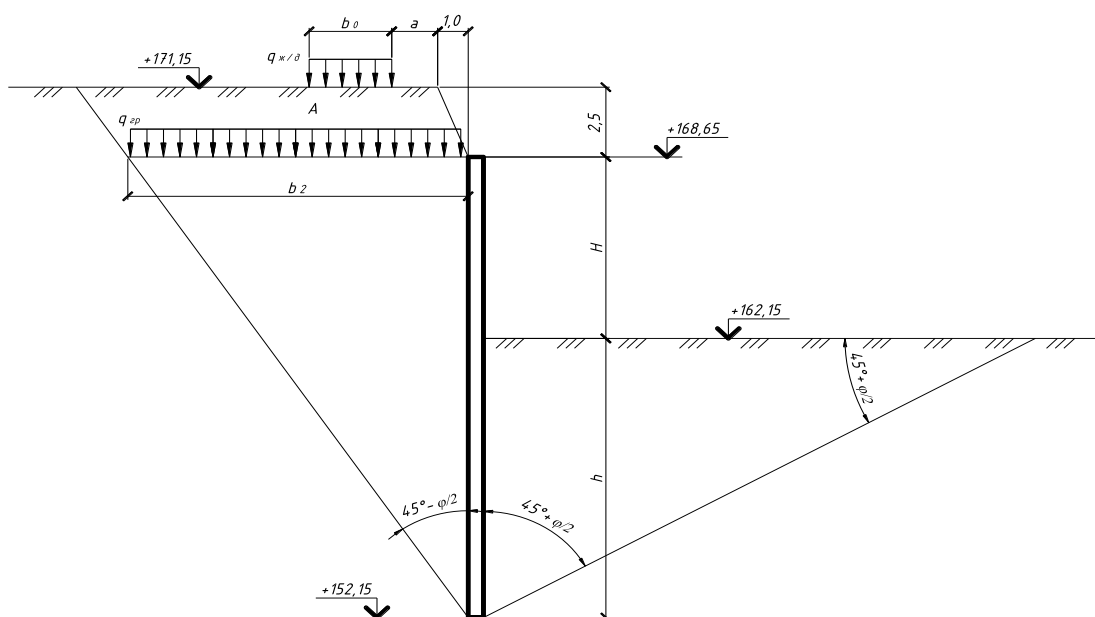


Рис. 2. Расчетная схема шпунтовой подпорной стены

Приложение активного и пассивного давлений грунта показаны на рис. 3.

Результирующая приведенной нагрузка от веса грунта области А:

$$P_{zp} = q_{zp} \cdot \xi_a \cdot y_{b1},$$

где $q_{zp} = \frac{S \cdot \gamma_1}{b_2}$ — распределенная нагрузка от веса грунта на отм. +168,65;

S — площадь области А.

$$y_{b1} = H + h.$$

Плечо момента от приведенной нагрузки от веса грунта области А:

$$r_{zp} = \frac{H + h}{2}.$$

Результирующая приведенной нагрузка для подвижного состава железных дорог:

$$P_{жс/\partial} = \frac{q_{жс/\partial} \cdot \gamma_1 \cdot \xi_a}{1 + 2 \cdot \operatorname{tg} \theta_o \cdot y_a / b_0},$$

где $q_{жс/\partial} = \frac{Q + G}{l \cdot b} = \frac{100}{13 \cdot 2,7} = 28,5 \text{ кН/м}^2$ — распределенная нагрузка от грузового состава на уровне низа шпал; G — максимальный вес платформы грузового вагона; Q — максимальный вес груза; l — длина вагона; b — длина шпал.

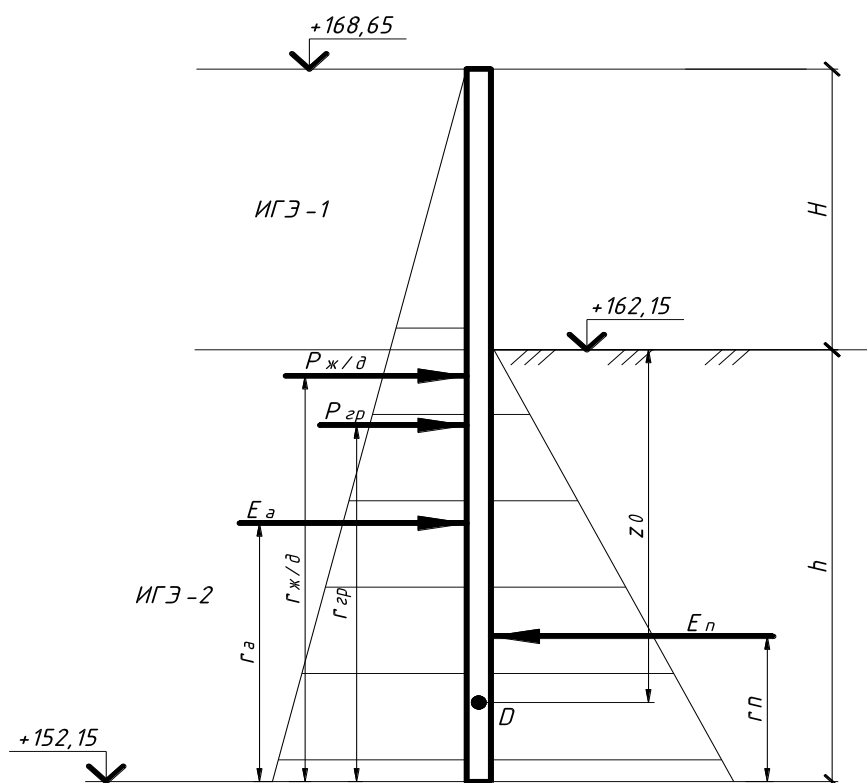


Рис. 3. Схема распределения активного и пассивного давлений на шпунт

$$y_{b2} = \frac{b_o + 2 \cdot \operatorname{tg} \theta_o \cdot y_{a2}}{\operatorname{tg} \theta_o} < y_{b1},$$

где $y_{a2} = \frac{a}{\operatorname{tg} \theta_o}$.

Плечо момента от приведенной нагрузки подвижного состава железных дорог:

$$r_{ж/д} = H + h + 2,5 - y_{a2} - \frac{y_{b2}}{2}.$$

Из уравнения моментов относительно точки А находим требуемую глубину забивки шпунтовой стенки:

$$\sum M_A = 0; \quad E_a \cdot r_a - E_n \cdot r_n + P_{зр} \cdot y_{b1} \cdot r_{зр} + P_{ж/д} \cdot y_{b2} \cdot r_{ж/д} = 0;$$

Вычисление максимального изгибающего момента

Вычисление точки с наибольшим изгибающим моментом ведется по формуле:

$$z_0 = \frac{p}{m} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m \cdot H}{p}} \right);$$

где $p = \gamma \cdot H \cdot \operatorname{tg} \theta_o$;

$$m = \gamma \cdot (\operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) - \operatorname{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)).$$

Максимальный изгибающий момент в точки D:

$$M_{\max} = E_a^{z_0} \cdot r_a^{z_0} - E_n^{z_0} \cdot r_n^{z_0} + P_{ep} \cdot (y_{b1} - z_0) \cdot r_{ep}^{z_0} + P_{жс/\partial} \cdot (y_{b2} - z_0) \cdot r_{жс/\partial}^{z_0}$$

$$\text{где } E_a^{z_0} = \frac{\gamma_1 \cdot (H + h - z_0)^2}{2} \cdot \xi_a;$$

$$E_n^{z_0} = \frac{\gamma_2 \cdot (h - z_0)^2}{2} \cdot \xi_n;$$

$$r_a = \frac{H + h - z_0}{3};$$

$$r_n = \frac{h - z_0}{3}$$

$$y_{b1} = H + h - z_0;$$

$$r_{ep} = \frac{H + h - z_0}{2};$$

$$r_{жс/\partial} = H + h + 2,5 - y_{a2} - \frac{y_{b2}}{2} - z_0.$$

Расчет шпунтовой стенки для неоднородного грунта с фиксированной точкой вращения

Результирующая активного давления грунта на шпунтовую стенку определяется по формуле:

$$E_a = \frac{\gamma_1 \cdot (H + h)^2}{2} \cdot \xi_a = \frac{19,5 \cdot (10 + 6,5)^2}{2} \cdot 0,455 = 1208 \text{ кН},$$

где $\gamma_1 = 19,5 \text{ кН/м}^3$ — плотность грунта ИГЭ-1; $H = 6,5 \text{ м}$ — высота подпора грунта; $h = 10 \text{ м}$ — глубина забивки шпунта; ξ_a — коэффициент активного давления грунта,

$$\xi_a = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2) = \text{tg}^2 34^\circ = 0,455.$$

Плечо момента активного давления грунта:

$$r_a = \frac{H + h}{3} = 5,5 \text{ м}.$$

Результирующая пассивного давления грунта на шпунтовую стенку определяется по формуле:

$$E_n = \frac{\gamma_2 \cdot h^2}{2} \cdot \xi_n = \frac{19,2 \cdot 10^2}{2} \cdot 3,255 = 3124 \text{ кН},$$

где $\gamma_2 = 19,2 \text{ кН/м}^3$ — плотность грунта ИГЭ-2; ξ_n — коэффициент пассивного давления грунта:

$$\xi_n = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) = \text{tg}^2 61^\circ = 3,255.$$

Плечо момента пассивного давления грунта:

$$r_n = \frac{h}{3} = \frac{10}{3} = 3,33 \text{ м}.$$

Результирующая приведенной нагрузки от веса грунта области А:

$$P_{zp} = q_{zp} \cdot \xi_a \cdot y_{b1} = 50,6 \cdot 0,45 \cdot 16,5 = 377,21 \text{ кН},$$

где $q_{zp} = \frac{S \cdot \gamma_2}{b_2} = \frac{28,68 \cdot 19,2}{10,9} = 50,6$ — распределенная нагрузка от веса грунта 2 на отм. +168,65; $S = 28,68 \text{ м}^2$ — площадь области А.

$$y_{b1} = H + h = 10 + 6,5 = 16,5 \text{ м};$$

Плечо момента от приведенной нагрузки от веса грунта области А:

$$r_{zp} = \frac{H + h}{2} = \frac{10 + 6,5}{2} = 8,25 \text{ м}.$$

Результирующая приведенной нагрузки для подвижного состава железных дорог:

$$P_{жс/\partial} = \frac{q_{жс/\partial} \cdot \gamma_1 \cdot \xi_a}{1 + 2 \cdot \operatorname{tg} \theta_o \cdot y_a / b_o},$$

где $q_{жс/\partial} = \frac{Q + G}{l \cdot b} = \frac{750 + 250}{13 \cdot 2,7} = 28,5 \text{ кН/м}^2$ — распределенная нагрузка от грузового состава на уровне низа шпал; $G = 250 \text{ кН}$ — максимальный вес платформы грузового вагона, $Q = 750 \text{ кН}$ — максимальный вес груза; l — длина вагона; $b = 2,7 \text{ м}$ — длина шпал.

$$y_{b2} = \frac{b_o + 2 \cdot \operatorname{tg} \theta_o \cdot y_{a2}}{\operatorname{tg} \theta_o} = \frac{2,7 + 2 \cdot \operatorname{tg} 34^\circ \cdot 3,71}{\operatorname{tg} 34^\circ} = 11,42 \text{ м} < y_{b1} = 16,5 \text{ м},$$

где $y_{a2} = \frac{a}{\operatorname{tg} \theta_o} = \frac{2,5}{\operatorname{tg} 34} = 3,71 \text{ м}.$

Плечо момента от приведенной нагрузки подвижного состава железных дорог:

$$r_{жс/\partial} = H + h + 2,5 - y_{a2} - \frac{y_{b2}}{2} = 6,5 + 10 + 2,5 - 3,71 - \frac{11,42}{2} = 9,59 \text{ м}.$$

Из уравнения моментов относительно точки А находим требуемую глубину забивки шпунтовой стенки:

$$\sum M_A = 0; \quad 1208 \cdot 5,5 - 3124 \cdot 3,33 + 22,86 \cdot 16,5 \cdot 8,25 + 5,46 \cdot 11,42 \cdot 9,59 = 0;$$

Вычисление максимального изгибающего момента

Вычисление точки с наибольшим изгибающим моментом ведется по формуле:

$$z_0 = \frac{p}{m} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m \cdot H}{p}} \right) = \frac{p}{m} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{m \cdot H}{p}} \right) = 3,88 \text{ м},$$

где $p = \gamma_1 \cdot H \cdot \xi_a = 19,5 \cdot 6,5 \cdot \text{tg}^2 34^\circ = 57,66 \text{ кН} / \text{м}^2$;

$m = \gamma_1 \cdot (\text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2) - \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)) = 19,5 \cdot (\text{tg}^2 34^\circ - \text{tg}^2 61^\circ) = 54,59 \text{ кН} / \text{м}^3$.

Максимальный изгибающий момент в точки D:

$$M_{\max} = E_a^{z_0} \cdot r_a^{z_0} - E_n^{z_0} \cdot r_n^{z_0} + P_{zp} \cdot (y_{b1} - z_0) \cdot r_{zp}^{z_0} + P_{жс/\partial} \cdot (y_{b2} - z_0) \cdot r_{жс/\partial}^{z_0},$$

где $E_a^{z_0} = \frac{\gamma_1 \cdot (H + h - z_0)^2}{2} \cdot \xi_a = \frac{19,5 \cdot (6,5 + 10 - 3,88)^2}{2} \cdot 0,455 = 706,31 \text{ кН}$;

$$E_n^{z_0} = \frac{\gamma_2 \cdot (h - z_0)^2}{2} \cdot \xi_n = \frac{19,2 \cdot (10 - 3,88)^2}{2} \cdot 3,255 = 1170 \text{ кН};$$

$$r_a = \frac{H + h - z_0}{3} = \frac{6,5 + 10 - 3,88}{3} = 4,21 \text{ м};$$

$$r_n = \frac{h - z_0}{3} = \frac{10 - 3,88}{3} = 2,04 \text{ м};$$

$$r_{zp} = \frac{H + h - z_0}{2} = \frac{6,5 + 10 - 3,88}{2} = 6,31 \text{ м};$$

$$r_{жс/\partial} = H + h + 2,5 - y_{a2} - \frac{y_{b2}}{2} - z_0 = 6,5 + 10 + 2,5 - 3,71 - \frac{11,42}{2} - 3,88 = 5,71 \text{ м};$$

$$M_{\max} = 706,31 \cdot 4,21 - 1170 \cdot 2,04 + 22,86 \cdot 12,62 \cdot 6,31 + 5,46 \cdot 7,54 \cdot 5,71 = 2,640 \times 10^3 \text{ кНм}.$$

Подбор сечения

Подбор сечения ведется по моменту сопротивления W_0 .

Наибольший изгибающий момент $M = 2,640 \times 10^3 \text{ кНм}$

Подбираем ПШС 80/150-8300, сталь С345, $R_y = 345 \text{ МПа}$ с характеристиками, представленными в табл. 2.

Необходимый момент сопротивления:

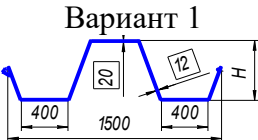
$$W_0 = \frac{M \cdot 1000}{0,95 \cdot R_y}; \quad W_0 = \frac{2640 \cdot 1000}{0,95 \cdot R_y} = 8055 \text{ см}^3.$$

Момент сопротивления ПШС 80/150-8300 $W_0 = 8300 > 8055 \text{ см}^3$.

Сечение удовлетворяет условию. Запас 3 %.

Принимаем сечение ПШС 80/150-8300. Общая длина шпунта 17 м.

Таблица 2 Характеристики ПШС 80/150-8300

Сечение профиля	Обозначение панели по ТУ 5264-006-01393674 - 01	Высота профиля H , мм	Площадь торца, см^2	Характеристика шпунтовой стены длиной 1м				Расчётный периметр, см
				Удельный расход стали m , кг/м ²	Момент инерции J_0 , см^4	Момент сопротивления W_0 , см^3	Коэффициент использования стали, W_0 / m	
 Вариант 1	80/150-8300	800	547	283,7	332000	8300	29,256	725

Расчет шпунтовой стенки для неоднородного основания с неизвестной точкой вращения

Методика расчета

Расчет, представленный в п. 2. ведется с рядом допущений, которые снижают его точность и увеличивают запас. Следовательно, возможно увеличение точности расчета и уменьшение запаса за счет отказа от некоторых допущений и, тем самым, уточнения расчета.

В данном случае расчет ведется при неизвестной точке Z_0 (рис. 4) вращения шпунтовой стенки (по нормативам данная точка принимается самой нижней точкой сваи).

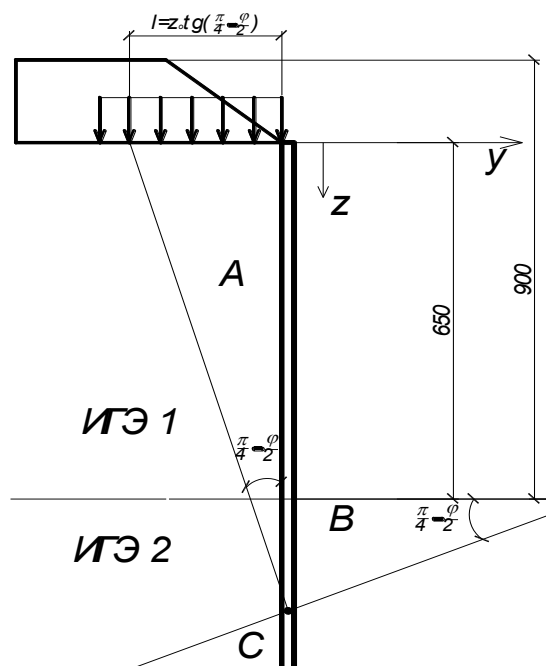


Рис. 4. Расчетная схема шпунтовой стенки с неизвестной точкой вращения

Отказ от данного допущения приводит к необходимости решения двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными, что значительно усложняет расчет, но позволяет более точно отразить реальные условия работы шпунтовой стенки, снизить запас, повысив тем самым экономический эффект.

Зона А является зоной активного давления грунта, т.е. зоной, в которой свая идет от грунта. Зоны В и С – зоны пассивного давления, где свая двигается на грунт (рис. 4).

Определим напряжения в зонах.

– в зоне А активного давления грунта:

$$\sigma_3 = \sigma_z = \gamma \cdot z + q;$$

$$\sigma_1 = \sigma_y = \frac{\gamma \cdot z + q}{A};$$

– в зоне В пассивного давления грунта:

$$\sigma_3 = \sigma_y = A\gamma(z - H);$$

$$\sigma_1 = \sigma_z = \gamma(z - H);$$

– в зоне С пассивного давления грунта:

$$\sigma_3 = \sigma_y = A\gamma \cdot z;$$

$$\sigma_1 = \sigma_z = \gamma \cdot z.$$

Эпюры давлений грунта на шпунтовую стенку показаны на ри. 5.

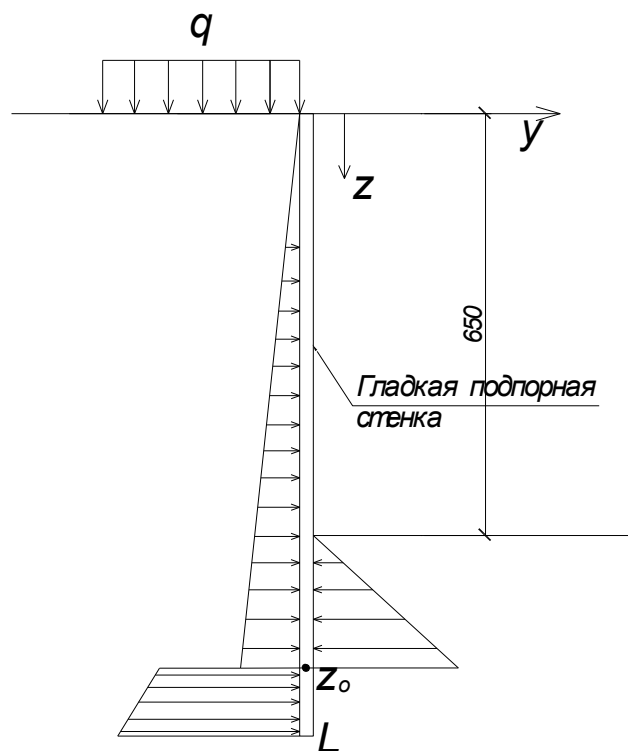


Рис. 5. Эпюры давлений грунта на шпунтовую стенку

Неизвестные z_0 и L определяются из системы двух уравнений:

а) Равенство проекций на ось y запишется в следующем виде:

$$\sigma_y^A(z_0) = \frac{\gamma \cdot z_0 + q}{A}; \quad \sigma_y^C(z_0) = A\gamma \cdot z_0; \quad \sigma_y^C(L) = A\gamma \cdot L;$$

$$\sigma_y^B(z_0) = A\gamma(z_0 - H); \quad \sigma_y^A(0) = \frac{q}{A}.$$

$$\frac{\sigma_y^A(0) + \sigma_y^A(z_0)}{2} \cdot z_0 + \frac{\sigma_y^C(z_0) + \sigma_y^C(L)}{2} \cdot (L - z_0) = \frac{\sigma_y^B(z_0) \cdot (z_0 - H)}{2}$$

или
$$\left(\frac{\gamma \cdot z_0 + q}{A} + \frac{q}{A}\right) \cdot z_0 + (A\gamma \cdot z_0 + A\gamma L)(L - z_0) = A\gamma(z_0 - H)^2$$

или
$$\frac{1}{A} \cdot (\gamma \cdot z_0 + 2q)z_0 + A\gamma(L^2 - z_0^2) = A\gamma(z_0 - H)^2$$

б) Равенство суммы моментов относительно точки x_0 нулю:

$$M_A = \frac{1}{A} \left(\frac{\gamma \cdot z_0^3}{6} + \frac{qz_0^2}{2} \right);$$

$$M_B = A\gamma \left(\frac{z_0^3}{6} - \frac{H \cdot z_0^2}{2} + \frac{H^2 \cdot z_0}{2} - \frac{H^3}{6} \right);$$

$$M_C = A\gamma \left(\frac{L^3}{3} - \frac{z_0 \cdot L^2}{2} + \frac{z_0^3}{6} \right).$$

Уравнение моментов относительно точки z_0 вращения шпунтовой стенки:

$$M_A = M_B + M_C$$

или

$$\frac{1}{A} \left(\frac{\gamma \cdot z_0^3}{6} + \frac{qz_0^2}{2} \right) = A\gamma \left(\frac{z_0^3}{6} - \frac{H \cdot z_0^2}{2} + \frac{H^2 \cdot z_0}{2} - \frac{H^3}{6} \right) + A\gamma \left(\frac{L^3}{3} - \frac{z_0 \cdot L^2}{2} + \frac{z_0^3}{6} \right).$$

Учет напластования грунтов:

Принимаем в областях В и С угол внутреннего трения $\varphi = 32^\circ$.

В верхней части области А $\varphi = 22^\circ$, в нижней части области А $\varphi = 32^\circ$.

а) Равенство проекций на ось y запишется в следующем виде:

$$\frac{\sigma_y^A(0) + \sigma_y^A(H)}{2} \cdot H + \frac{\sigma_y^A(H) + \sigma_y^A(z_0)}{2} \cdot (z_0 - H) = \frac{\frac{q}{A1} + \frac{\gamma H + q}{A1}}{2} \cdot H + \frac{\frac{\gamma H + q}{A1} + \frac{\gamma \cdot z_0 + q}{A1}}{2} \cdot (z_0 - H),$$

тогда уравнение сил будет выглядеть так:

$$\left(\frac{q}{A1} + \frac{\gamma H + q}{A1} \right) H + \left(\frac{\gamma H + q}{A1} + \frac{\gamma \cdot z_0 + q}{A} \right) \cdot (z_0 - H) + A\gamma(L^2 - z_0^2) = A\gamma(z_0 - H)^2;$$

б) Равенство суммы моментов относительно точки x_0 нулю.

$$M_A = M_1 + M_2$$

$$M_1 = \int_{z_0}^H \frac{\gamma \cdot z + q}{Al} (z - z_0) dz = \frac{1}{Al} \left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2} \right);$$

$$M_2 = \int_H^{z_0} \frac{\gamma \cdot z + q}{A} (z_0 - z) dz = \frac{1}{A} \left(\frac{\gamma z_0^3}{6} + \frac{qz_0^2}{2} \right) - \frac{1}{A} \left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2} \right);$$

$$M_A = \frac{1}{A} \left(\frac{\gamma z_0^3}{6} + \frac{qz_0^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{Al} - \frac{1}{A} \right) \left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2} \right);$$

$$M_B = \int_H^{z_0} \sigma_y^B (z_0 - z) dz = \int_H^{z_0} A\gamma(z - H)(z_0 - z) dz = A\gamma \int_H^{z_0} (zz_0 - z^2 - Hz_0 + Hz) dz = A\gamma \left(z_0 \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{3} \right) -$$

$$- Hz_0 z + H \frac{z^2}{2} \Big|_H^{z_0} = A\gamma \left(\frac{z_0^3}{6} - H \frac{z_0^2}{2} + \frac{H^2 z_0}{2} - \frac{H^3}{6} \right)$$

$$M_C = \int_{z_0}^L \sigma_y^C (z_0 - z) dz = \int_{z_0}^L A\gamma(z - z_0) dz = A\gamma \int_{z_0}^L (z^2 - zz_0) dz = A\gamma \left(\frac{z^3}{3} - z_0 \frac{z^2}{2} \right) \Big|_{z_0}^L = A\gamma \left(\frac{L^3}{3} - z_0 \frac{L^2}{2} + \frac{z_0^3}{6} \right).$$

Тогда уравнение моментов будет выглядеть так:

$$\frac{1}{A} \left(\frac{\gamma z_0^3}{6} + \frac{qz_0^2}{2} \right) + \left(\frac{1}{Al} - \frac{1}{A} \right) \left(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{qH^2}{2} \right) = A\gamma \left(\frac{z_0^3}{6} - \frac{H \cdot z_0^2}{2} + \frac{H^2 \cdot z_0}{2} - \frac{H^3}{6} \right) +$$

$$A\gamma \left(\frac{L^3}{3} - \frac{z_0 \cdot L^2}{2} + \frac{z_0^3}{6} \right).$$

Расчет шпунтовой стенки для неоднородного основания с неизвестной точкой вращения

Исходные данные аналогичны с п. 2 — расчетом шпунтовой стенки для неоднородного основания с фиксированной точкой вращения.

Определяем прочностные характеристики грунта определяются в соответствии с условием прочности Кулона-Мора:

$$A = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = 3,255 \quad Al = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} = 2,198.$$

Начальное приближение:

$$L = 15 \text{ м}, z_0 = 13 \text{ м}.$$

Решаем систему уравнений:

$$\left(\frac{q}{Al} + \frac{\gamma H + q}{Al} \right) H + \left(\frac{\gamma H + q}{Al} + \frac{\gamma \cdot z_0 + q}{A} \right) \cdot (z_0 - H) + A\gamma(L^2 - z_0^2) = A\gamma(z_0 - H)^2;$$

$$\frac{1}{A}(\frac{\gamma z_o^3}{6} + \frac{q z_o^2}{2}) + (\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A})(\frac{\gamma H^3}{6} + \frac{q H^2}{2}) = A\gamma(\frac{z_o^3}{6} - \frac{H \cdot z_o^2}{2} + \frac{H^2 \cdot z_o}{2} - \frac{H^3}{6}) +$$

$$A\gamma(\frac{L^3}{3} - \frac{z_o \cdot L^2}{2} + \frac{z_o^3}{6});$$

$$z_o > H.$$

Корни системы уравнений: $(z_o, H) = (13.804, 14.583)$.

Из уравнения прочности шпунта определяем Z :

$$(\frac{\gamma}{2A} - \frac{A\gamma}{2}) \cdot Z^2 + (\frac{q}{A} + A\gamma \cdot H) \cdot Z - \frac{A\gamma \cdot H^2}{2} = 0;$$

$$Z > H.$$

$Z = 10,418$ м — сечение с наибольшим изгибающим моментом.

Наибольший изгибающий момент при $z_o = 10,418$ м:

$$\frac{1}{A}(\frac{\gamma \cdot z_o^3}{6} + \frac{q z_o^2}{2}) + (\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A})(\frac{\gamma \cdot H^3}{6} + \frac{q H^2}{2}) - A\gamma(\frac{z_o^3}{6} - \frac{H \cdot z_o^2}{2} + \frac{H^2 \cdot z_o}{2} - \frac{H^3}{6}),$$

$M = 1,626 \times 10^3$ кНм — наибольший изгибающий момент.

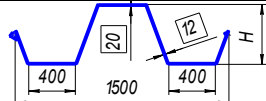
Подбор сечения

Подбор сечения ведется по моменту сопротивления W_o .

Наибольший изгибающий момент $M = 1.626 \times 10^3$ кНм

Подбираем ПШС 80/150-6075, сталь С345, $R_y = 345$ Мпа с характеристиками, представленными в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики ПШС 80/150-6075

Сечение профиля	Обозначение панели по ТУ 5264-006-01393674-01	Высота профиля H , мм	Площадь торца, см^2	Характеристика шпунтовой стены длиной 1 м				Расчётный периметр, см
				Удельный расход стали m , кг/м ²	Момент инерции J_o , см^4	Момент сопротивления W_o , см^3	Коэффициент использования стали, W_o / m	
	80/150-6075	800	455,0	235,4	243100	6075	25,807	730

Необходимый момент сопротивления сечения:

$$W_o = \frac{M \cdot 1000}{0.95 \cdot R_y}; \quad W_o = \frac{1626 \cdot 1000}{0.95 \cdot R_y} = 4961 \text{ см}^3.$$

Момент сопротивления ПШС 80/150-6075 $W_o = 6075 \text{ см}^3 > 4961 \text{ см}^3$.

Сечение удовлетворяет условию. Запас 22 %.

Принимаем сечение ПШС 80/150-6075. Общая длина свай 16 м.

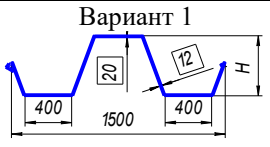
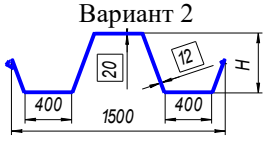
Заключение

По расчету, приведенному в пункте 2 было подобрано сечение ПШС 80/150-8300 с общей длиной сваи 17 м. Расчет, представленный в п.2 ведется с рядом допущений, которые снижают его точность и увеличивают запас. Следовательно, возможно увеличение точности расчета и уменьшение запаса за счет отказа от некоторых допущений и, тем самым, уточнения расчета.

В данном случае расчет ведется при неизвестной точке Z_0 вращения шпунтовой стенки (по нормативам данная точка принимается самой нижней точкой сваи). Отказ от данного допущения приводит к необходимости решения двух нелинейных уравнений с двумя неизвестными, что значительно усложняет расчет, но позволяет более точно отразить реальные условия работы шпунтовой стенки, снизить запас, повысив тем самым экономический эффект.

По расчету, приведенному в п. 3 было подобрано сечение ПШС 80/150-6075. Ниже приведем сравнительные характеристики обоих вариантов (табл. 4).

Таблица 4. Сравнение характеристик шпунта обоих вариантов

Сечение профиля	Обозначение панели по ТУ 5264-006-01393674-01	Высота профиля H , мм	Площадь торца, см^2	Характеристика шпунтовой стены длиной 1 м				Расчётный периметр, см
				Удельный расход стали m , кг/м^2	Момент инерции J_0 , см^4	Момент сопротивления W_0 , см^3	Коэффициент использования стали, W_0 / m	
	80/150-8300	800	547	283,7	332000	8300	29,256	725
	80/150-6075	800	455,0	235,4	243100	6075	25,807	730

Вариант 1. Общий расход стали для сечения ПШС 80/150-8300, длина шпунта 17 м:

$$S_1 = 283,7 \times 17 \times 60 = 289 \text{ т.}$$

Вариант 2. Общий расход стали для сечения ПШС 80/150-6075, длина шпунта 16 м:

$$S_1 = 235,4 \times 16 \times 60 = 226 \text{ т.}$$

Разница в расходе стали составляет 63 т, или, приблизительно 5 355 000 руб. Следовательно, выбираем вариант 2 — ПШС 80/150-6075, длина шпунта 16 м, запас 22 %.

Несмотря на увеличение трудоемкости расчета шпунтового ограждения с неизвестной точкой вращения в сравнении с нормативным расчетом, несомненна его экономическая целесообразность.

Список источников

1. Мангушев, Р. А. Учет расчетных параметров шпунтовых стен профиля «Ларсен» при проектировании ограждений котлованов / Р. А. Мангушев, А.Б. Фадеев // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017. – Выпуск 13. – Т. 4. – С. 114-120. DOI:10.22337/2587-9618-2017-13-4-114-120.
2. Проектирование и устройство подземных сооружений в открытых котлованах / Р. А. Мангушев, Н. С. Никифорова, В. В. Конюшков [и др.]. – М.: АСВ, 2013. – 256 с.
3. Мангушев, Р. А. Опыт сохранения соседних зданий при устройстве котлованов больших объемов в условиях плотной застройки / Р. А. Мангушев, Л. В. Гарнык, А. И. Осокин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 5. – С. 10-13.
4. Полищук, А. И. Оценка работы разделительных ограждений в слабых глинистых грунтах, устраиваемых для защиты существующих зданий и влияния нового строительства / А. И. Полищук, А. С. Межаков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7. – № 2. – С. 124-131.
5. Знаменский, В. В. Устройство ограждающих систем котлованов в стесненных городских условиях / В. В. Знаменский, Д. Ю. Чунюк, Е. Б. Морозов // Жилищное строительство. – 2012. – № 9. – С. 60-62.
6. Зерцалов, М. Г. Влияние распорной системы ограждения котлована на противодействие прогрессирующему обрушению / М. Г. Зерцалов, А. В. Исаев // Промышленное и гражданское строительство. – 2025. – № 6. – С. 65-69. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.06.65-69.
7. Конюшков, В. В. Сравнительный анализ методов расчетов ограждающих конструкций котлованов / В. В. Конюшков // Вестник гражданских инженеров. – 2021. – № 3. – С. 92-99. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-3-92-99.
8. Тютерев, В. В. Шпунт корытного типа с повышенными инерционными характеристиками / В. В. Тютерев, В. Ю. Рубцов // Строительство и реконструкция. – 2021. – № 4. – С.16-22. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-96-4-16-22>.
9. Проектирование подпорных стен и стен подвалов. Справочное пособие к СНиП 2.09.03-85. – М.: Стройиздат, 1990. – 104 с.

© Дыба В. П. Чутченко С. Г., Матвиенко М. П., 2026