DOI:10.22337/2587-9618-2017-13-4-114-120

УЧЕТ РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШПУНТОВЫХ СТЕН ПРОФИЛЯ «ЛАРСЕН» ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОГРАЖДЕНИЙ КОТЛОВАНОВ

Р.А. Мангушев, А.Б. Фадеев
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, РОССИЯ

Аннотация: Механизм работы, жесткость и прочность на изгиб шпунтовых стен из рофиля Ларсен зависит от сопротивляемости сдвигу замковых сочленений свай в стене. Этот факт не учитывается в отечественной практике проектирования и устройства шпунтовых стен.

Ключевые слова: стальные шпунтовые стенки, показатели прочности и жесткости, замковые соединения, момент инерции, момент сопротивления

THE ACCOUNT OF OPTIONS SHEET OF WALLS PROFILE LARSEN IN THE DESIGN OF EXCAVATIONS SUPPORTING WALLS

Rashid A. Mangushev, Alexandr B. Fadeev
Saint-Petersburg State Architecture and Construction University, Saint-Petersburg, RUSSIA

Abstract: Bending stiffness and strength of steel sheet retaining walls is strongly dependent on shear resistance of pile interlocks. This fact, usually, is not taken into account in domestic practice of design and construction of sheet walls.

Keywords: steel sheet pile wall, strength and rigidity of the tool joint, moment of inertia, moment of resistance

ВВЕДЕНИЕ

Стальные шпунтовые стены широко используются в различных областях геотехнического строительства. Их достоинствами являются быстрота и относительная простота возведения, высокая прочность, малая водопроницаемость, возможность демонтажа и повторного использования. В конечном итоге стальные шпунтовые стены обычно оказываются экономичнее других подпорных конструкций.

Показатели жесткости и прочности шпунтовых стен из профилей Ларсен зависят от сопротивляемости замковых сочленений свай сдвиговым усилиям, возникающим между четными и нечетными сваями в стене. Этот факт не учитывается в отечественной практике проектирования и устройства шпунтовых стен, что может иметь неблагоприятные последствия.

1. УСИЛИЯ В ЗАМКАХ

Для устройства шпунтовых ограждений котлованов обычно используются горячекатаные стальные сваи U-профиля (Ларсен) и Z-профиля (рис.1) [1]. В европейской практике чаще находит применение U-профиль, в США обычно предпочтение отдается Z-профилю.

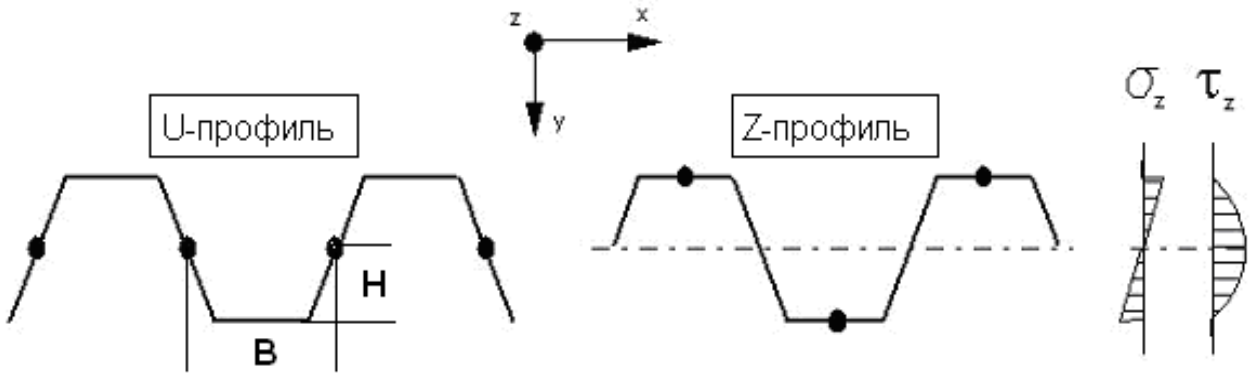

Рисунок 1. Положение замков и распределение напряжений.

Таблица 1. Параметры сечений шпунта U-профиля.

Профиль	Размеры сечения сваи, м		Масса 1 м, кг		Момент инерции I, см^4		Момент сопротивления W, см^3	
	B	H	сваи	стены	сваи	1м стены	сваи	1м стены
Л4	0,40	0,18	74	185	4660	39600	405	2200
Л5	0,42	0,18	100	238	6243	54000	461	2962

При изгибе шпунтовой стены в плоскости y-z максимальные нормальные напряжения σ_z возникают в крайних волокнах сечения стены, а максимальные напряжения сдвига τ_z возникают на нейтральной оси сечения. Принципиальное различие стен из U и Z профилей заключается в положении замков сочленений свай: у Z-стен замки находятся на крайних волокнах сечения и на них не передаются сдвиговые усилия, а у U-стен замки находятся на нейтральной оси и на них передаются максимальные сдвигающие силы. Если сопротивляемость замков достаточно велика и взаимного сдвига свай в них не происходит, то сечение стены работает как сплошное с максимальными моментами инерции и сопротивления. Если же сопротивляемость взаимному сдвигу свай равна нулю и сваи в замках свободно проскальзывают, то стена превращается в ряд независимо работающих свай с их параметрами.

В табл.1 приводятся параметры отечественных U-профилей Л4 и Л5.

В таблице 1 моменты инерции и сопротивления 1 м стены приводятся для сплошного сечения без проскальзывания в замках. В отечественной практике проектирования шпунтовых стен именно эти значения и используются. Между тем зарубежные производители U-профилей шпунта, приводя такие показатели, обязательно оговаривают, что они действительны лишь при условии наличия необходимой прочности замка на сдвиг [2,3,4,5].

Величина сил сопротивления взаимному сдвигу соседних свай в стене определяется следующими составляющими:

- трение в замке из-за вариаций геометрии замка по длине сваи,
- трение в замке из-за защемленного в замке грунта,
- трение сваи о грунт.

Однако, этих сил сопротивления может оказаться недостаточно для противостояния сдвигу, особенно в слабых глинах и суглинках при вибропогружении шпунта. В этом случае грунтовое заполнение замка будет скорее играть роль смазки, нежели усилителя трения.

На рис.2 приведены три расчетных графика сдвигающей силы в замке по глубине шпунтовой стены, подпертой в уровне -2,0 м [4].

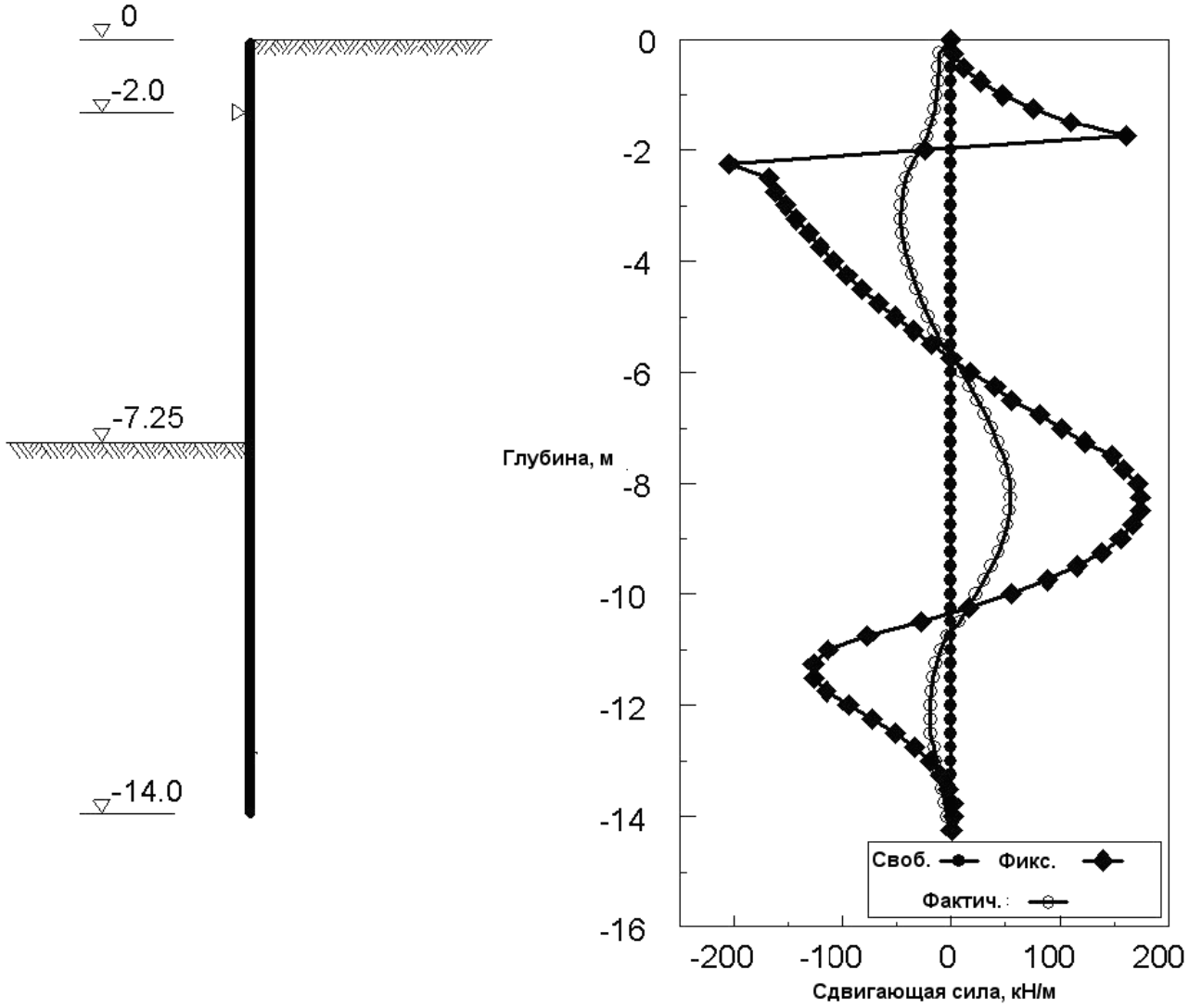

Рисунок 2. Графики сдвигающей силы в замке шпунтовой стены.

При свободном сочленении свай в замке сдвигающая сила по всей глубине естественно равна нулю. При полной фиксации замка от сдвига сдвигающая сила максимальна. Фактический график сдвигающей силы, построенный для реального грунта, находится в промежутке между двумя крайними случаями, при этом сила сопротивления сдвигу свай в замке составляет около 1/3 от величины, необходимой для полного исключения сдвига. Естественно, использование при расчетах в этом случае параметров профилей, определенных для условий полной фиксации в замках, привело бы к опасной переоценке сопротивляемости стены. Известны аварийные ситуации, возникшие по такой причине [1,4].

Радикальной мерой для исключения сдвига в замке является его сварка или чеканка. В зарубежной практике обычно шпунтовые сваи U-профиля (да и Z-профиля тоже) погружаются сочлененными попарно, а изготовители обеспечивают поставку сдвоенных и даже строенных свай с гарантированной сопротивляемостью замков сдвигу. Чаще всего замки на сдвоенных сваях скрепляются точечной чеканкой через 25-30 см. Каждая чеканка обеспечивает сопротивление сдвигу не ниже 75 кН [5].

Наличие заводской сварки или чеканки каждого второго замка в стене приближает ее моменты инерции и сопротивления к максимальным значениям.

При отсутствии сварки или чеканки замков стена в слабом водонасыщенном глинистом грунте будет иметь моменты инерции и сопротивления, близкие к минимальным значениям, равным арифметической сумме моментов свай, приходящихся на 1 метр стены:

$$I_{\text{стены}} = I_{\text{сваи}}/B; \quad W_{\text{стены}} = W_{\text{сваи}}/B,$$

где B – ширина сваи, м).

Расчетный изгибающий момент M для шпунтовой стены определяется выражением:

$$M = WR_y,$$

где R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести).

В табл. 2 приведены значения момента инерции, момента сопротивления и расчетного изгибающего момента для 1 м шпунтовых стен со свободными и фиксированными замками. Материал шпунтовых свай сталь С235 с расчетным сопротивлением R_y =230 МПа.

Из табл.2 видно, что отсутствие сварки или чеканки замков может снизить момент инерции стены более чем втрое и соответственно увеличить деформации стены и осадки окружающих сооружений. Одновременно момент сопротивления и расчетный изгибающий момент стены снижаются более чем вдвое, что заставит использовать более тяжелый профиль.

Необходимость фиксации замков закреплена в европейских нормах [3], но пока не нашла отражения в отечественной нормативной документации.

2. РАСЧЕТНЫЙ ПРИМЕР

В Петербурге на одном из объектов спроектировано шпунтовое ограждение и под его защитой осуществлялась откопка строительного котлована. Было выполнено численное моделирование сооружения стены и откопки котлована с помощью программы Plaxis в плоской постановке.

Общая расчетная схема приведена на рис.3.

Грунты - характерные для Петербурга: преимущественно водонасыщенные пылеватые пески и слабые суглинки. Свойства грунтов в порядке следования слоев на рис. 3 приведены в табл. 3.

По поверхности грунта за пределами откапываемого котлована приложена нагрузка 20 кПа.

Откопка котлована выполняется в 3 фазы: до глубины 4, 8 и 10 м.

Борт котлована поддерживается стеной из шпунта Л5. Глубина стены 13,5 м. Шпунтовая стена опирается на 3 яруса распорок, устанавливаемых последовательно по мере откопки котлована. Жесткость распорок EA=1,000E+06 кН на 1 м стены.

Были выполнены две серии моделирования:

1 – изгибная жесткость шпунтовой стены соответствует стене с фиксированными замками: EI=1,069E+05 кНм^2/м;

2 – изгибная жесткость шпунтовой стены соответствует стене со свободными замками: EI=3,062E+04 кНм^2/м.

Все прочие параметры в обеих сериях моделирования одинаковы.

На рис.4 а,б,в приведена общая картина деформаций после 1, 2 и 3-й фазы откопки котлована (стена с фиксированными замками), а на рис.4г,д,е – то же для стены со свободными замками.

Максимальное перемещение узловых точек на рис.4а составляет 65,0 мм, на рис.4б – 65,4 мм, на рис .4в – 52,8 мм, на рис.4г – 84,0 мм, на рис.4д – 112,3 мм, на рис.4е – 104,7 мм. Сравнительный анализ результатов расчета, позволил установить, что при свободных замках все деформации примерно в два раза выше, чем при фиксированных.

Усилия в распорках мало зависят от состояния замков. Максимальное усилие в распорках при фиксированных замках составило 442,9 кН/м, при свободных замках – 471,4 кН/м.

Таблица 2. Расчетные параметры шпунтовых стен.

Тип профиля	Состояние замков	Момент инерции I, см^4/м	Момент сопротивления, W, см^3/м	Расчетный изгибающий момент M, кНм/м
Л4	свободны	11650	1012	234
	фиксированы	39600	2200	506
Л5	свободны	14864	1098	252
	фиксированы	54000	2962	681

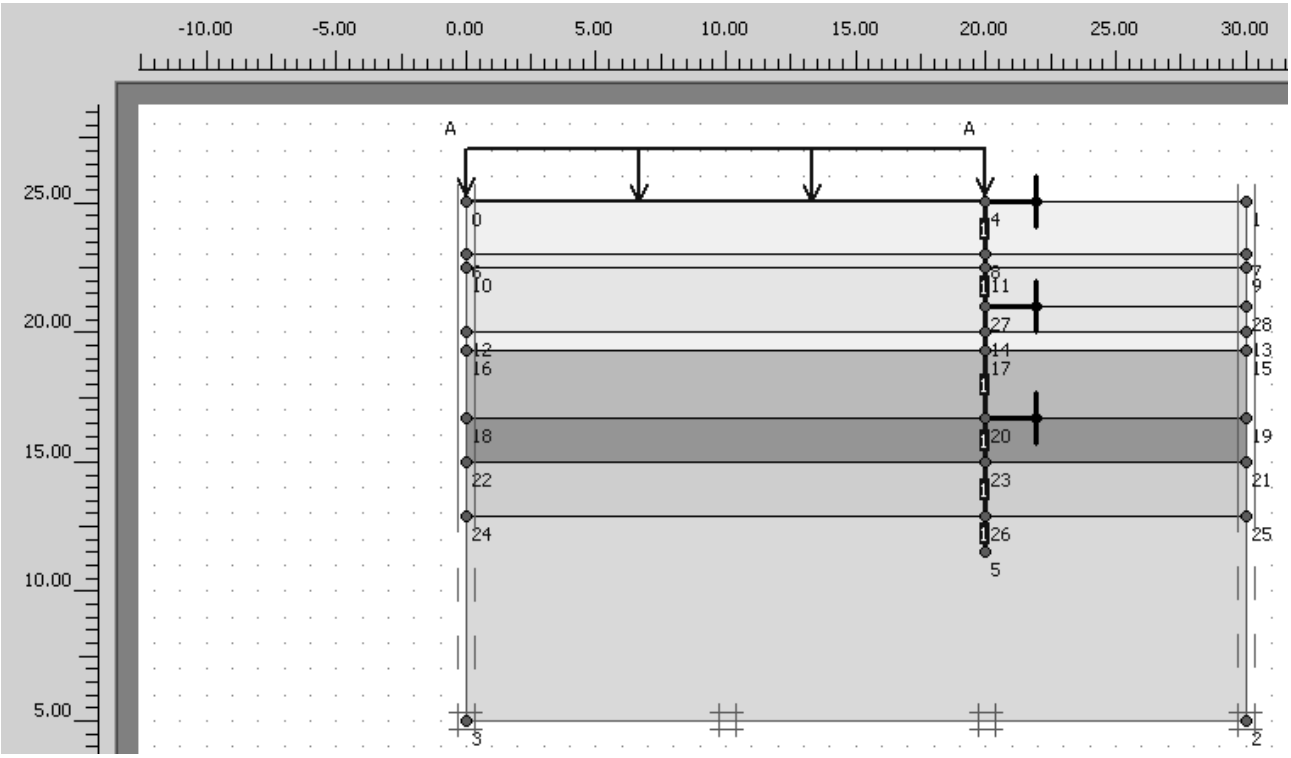

Рисунок 3. Общая расчетная схема.

Таблица 3. Свойства грунтов строительной площадки.

№ слоя	Объемный вес, кН/м3	Модуль деформации кН/м^2	Сцепление кН/м^2	Угол вн. тр. градусов
1	19,7	6000	8,0	14,8
2	20,0	18000	1,0	25,45
3	20,0	11000	1,3	23,6
4	19,7	6000	8,0	14,8
5	18,0	4000	3,3	11,3
6	19,5	9000	8,7	12,2
7	20,6	22000	21,3	13,9
8	21,8	32000	33,3	18,3

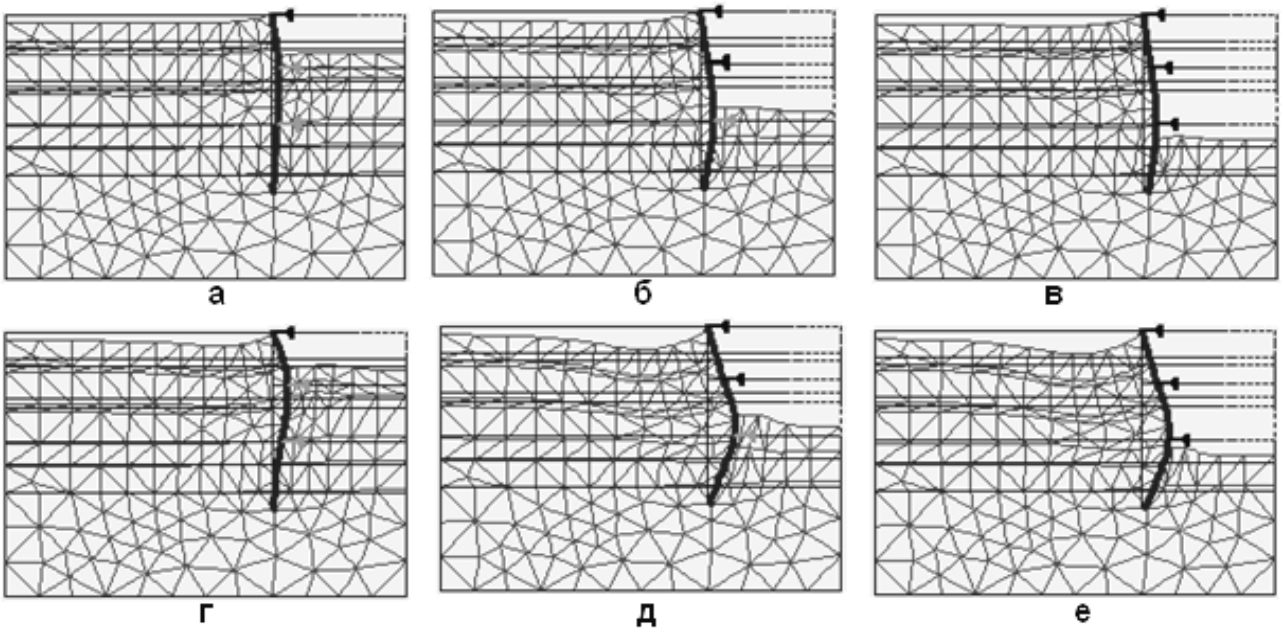

Рисунок 4. Деформации стены и грунта в ходе откопки при фиксированных (а,б,в) и свободных замках(г,д,е).

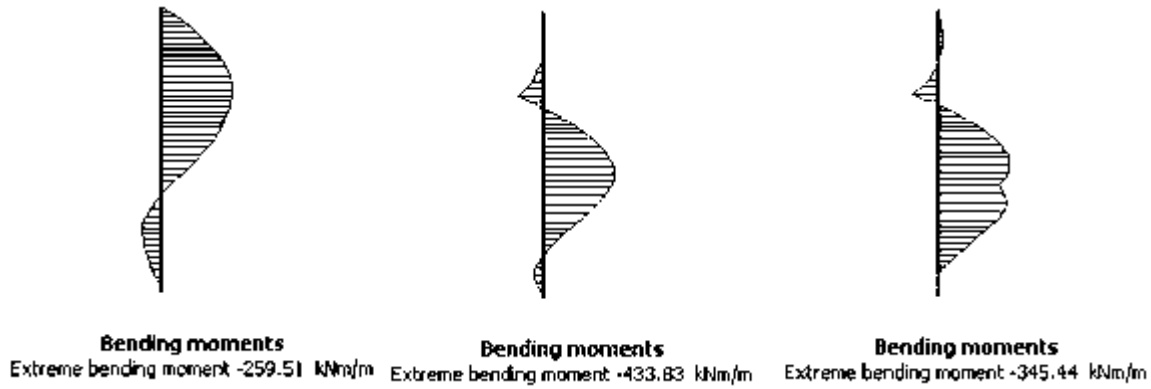

Рисунок 5. Эпюры изгибающих моментов в шпунтовой стене с фиксированными замками на 1, 2 и 3 фазе откопки.

На рис.5 приведены эпюры изгибающих моментов в шпунтовой стене с фиксированными замками на 1, 2 и 3 фазе откопки.

Максимальный изгибающий момент 433,83 кНм/м возникает на 2 фазе. Это ниже расчетного момента профиля Л5 с фиксированными замками 681 кНм/м (табл. 2), то есть прочность стены достаточна.

Эпюры изгибающих моментов в стене со свободными замками по форме аналогичны рис. 5, но абсолютные величины моментов примерно в 1,5 раза ниже вследствие меньшей жесткости стены. Максимальный изгибающий момент возникает также на 2 фазе и составляет 320,08 кНм/м. Эта величина превышает расчетный момент профиля Л5 со свободными замками 252 кНм/м (табл.2), то есть прочность стены на изгиб со свободными замками недостаточна.

Таким образом, рассматриваемая шпунтовая стена, сооруженная без мер усиления замков, может прийти в аварийное состояние при возникновении сдвигов в замках. Рассмотренный пример наглядно демонстрирует необходимость учета состояния замков при проектировании шпунтовых стен.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для устройства шпунтовых стен в отечественной практике обычно используются стальные сваи U-профиля (Ларсен). Жесткость и прочность таких стен зависит от величины сил сопротивления взаимному сдвигу соседних шпунтовых свай в замках. До сих пор, этому факту не уделяется должного внимания и часто, по умолчанию, шпунтовые ограждения проектируются на максимальные показатели, что создает предпосылки для возникновения аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мангушев Р.А., Никифорова Н.С., Конюшков В.В., Осокин А., Сапин Д.С.** Проектирование и устройтво подземных сооружений в открытых котлованах. – М.: АСВ, 2013. – 256 с.
2. **Carl A.Thoresen**. Port Designer's Handbook, 2003, 549 pages.
3. CEN: ENV1993-5 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 5: Piling, 1997.
4. Bending Behavior of Double U Sheet Piles. http://www.skylinesteel.com/assets/WhitePapers/locked/DoubleUPileBehaviorWP.doc.
5. Piling Handbook. ArcelorMittal. 8th Edition. 2008. http://www.skylinesteel.com/resource/piling101.aspx.
6. Sheet Piling Handbook. Design. Thyssen-Krupp GfT Bautechnik GmbH. http://www.tkgftbautechnik.com/english/_pdf/Rammprofile/Sheet-piling_handbook.pdf.

REFERENCES

1. **Mangushev R.A., Nikoforova N.S., Konushkov V.V., Osokin A., Sapin D.S.** Proektirovaniye i ustroystvo podzemnikh sooruzheniy v otkritikh kotlovanakh [Design and Construction of Underground Structures in Open Pits]. Moscow, ASV Publishing House, 2013, 256 pages.
2. **Carl A.Thoresen**. Port Designer's Handbook, 2003, 549 pages.
3. CEN: ENV1993-5 Eurocode 3: Design of steel structures, Part 5: Piling, 1997.
4. Bending Behavior of Double U Sheet Piles. http://www.skylinesteel.com/assets/WhitePapers/locked/DoubleUPileBehaviorWP.doc.
5. Piling Handbook. ArcelorMittal. 8th Edition. 2008. http://www.skylinesteel.com/resource/piling101.aspx.
6. Sheet Piling Handbook. Design. Thyssen-Krupp GfT Bautechnik GmbH. http://www.tkgftbautechnik.com/english/_pdf/Rammprofile/Sheet-piling_handbook.pdf.

Мангушев Рашид Абдуллович, член-корреспондент РААСН, профессор, доктор технических наук; заведующий кафедрой геотехники Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета (СПбГАСУ), директор научно производственного консалтингового центра геотехнологий СПбГАСУ. Россия , Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская 4;
e-mail: ramangushev@yandex.ru.

Фадеев Александр Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры геотехники СПбГАСУ.

Mangushev Rashid Abdullovich, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Doctor of Technical Sciences; Head of Geotechnical Department, Saint-Petersburg State Architecture and Construction University, Director of Scientific and Consulting Centre of Geotechnologies, Russia, Saint-Petersburg, 2-ya Krasnoarmeyskaya 4; e-mail: ramangushev@yandex.ru.

Fadeev Aleksandr Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Geotechnical Department Saint-Petersburg State Architecture and Construction University.