

*Н.Н. Хонелия, к.т.н., доцент
И.Н. Мироненко, к.т.н., доцент
А.В. Слободяник, ассистент
Р.Р. Багратиони, магистр
Одесский национальный морской университет*

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТОНКОЙ ПОДПОРНОЙ СТЕНКИ С ОБРАТНОЙ ЗАСЫПКОЙ ПРИ НАЛИЧИИ РЕБЕР ЖЕСТКОСТИ

Рассмотрен вопрос определения бокового давления грунта на тонкую подпорную стенку с контрфорсами (ребрами жесткости), расположенными со стороны грунтовой засыпки. При решении поставленных задач проведены лабораторные экспериментальные исследования, выполненные в грунтовом лотке на моделях стальной подпорной стенки с ребрами жесткости различной конфигурации. Установлена зависимость бокового давления грунта на тонкую подпорную стенку от геометрических параметров контрфорса. Результаты лабораторных исследований представлены в виде эпюр бокового давления грунта и перемещения стенки по высоте. Достоверность полученных результатов обоснована выполнением численных экспериментов и математического моделирования.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, подпорная стенка, ребра жесткости, засыпка, давление грунта.

*Н.Н. Хонелія, к.т.н., доцент
І.М. Мироненко, к.т.н., доцент
Г. В. Слободяник, асистент
Р.Р. Багратіоні, магістр
Одеський національний морський університет*

ВЗАЄМОДІЯ ТОНКОЇ ПІДПІРНОЇ СТІНКИ ЗІ ЗВОРотною ЗАСИПКОЮ ЗА НАЯВНОСТІ РЕБЕР ЖОРСТКОСТІ

Розглянуто питання визначення бокового тиску ґрунту на тонку підпірну стінку з контрфорсами (ребрами жорсткості), розташованими з боку ґрунтової засипки. При розв'язанні поставлених завдань здійснено лабораторні експериментальні дослідження, виконані у ґрунтовому лотку на моделях сталеві підпірної стінки з ребрами жорсткості різної конфігурації. Установлено залежність бічного тиску ґрунту на тонку підпірну стінку від геометричних параметрів контрфорса. Результати лабораторних досліджень наведено у вигляді епюр бічного тиску ґрунту й переміщення стінки по висоті. Достовірність отриманих результатів обґрунтовано виконанням числових експериментів і математичного моделювання.

Ключові слова: експериментальні дослідження, підпірна стінка, ребра жорсткості, засипка, тиск ґрунту.

*N.N. Khoneliya, PhD, Associate Professor
I.M. Myronenko, PhD, Associate Professor
A.V. Slobodyanik, assistant
R.R. Bahrationsi, master degree
Odessa National Maritime University*

INTERACTION BETWEEN A THIN RETAINING WALL WITH BACKFILL IN THE PRESENCE OF THE RIBS OF INFLEXIBILITY

The question of the definition of lateral earth pressure on a thin retaining wall with buttresses (ribs), arranged from the side of a gravel backfill was considered. Laboratory experimental researches were carried out during the solution of given tasks. Researches were fulfilled in a soil tray models steel retaining wall with ribs of different configurations. The dependence of the lateral earth pressure on a thin retaining wall from the geometric parameters of the buttress was established. The laboratory results are presented as curves of lateral earth pressure and displacement of the wall height. The accuracy of the obtained results was justified by the implementation of numerical experiments and mathematical modeling.

Keywords: *experimental studies, retaining wall, ribs, ground pressure*

Введение. Тонкие подпорные стенки состоят из тонкой стены ограждения и системы анкерования в виде анкерных тяг или наклонных свай. Лицевая стенка в большинстве случаев выполняется из металлического или железобетонного шпунта (из свай). Как показывает анализ конструктивных решений рассматриваемых подпорных стен, грунт в этих конструкциях создает нагрузку, которая должна быть воспринята сооружением. В силу больших величин боковых давлений, создаваемых грунтом, конструкции подпорных стен получаются дорогостоящими.

Одной из основных задач взаимодействия подпорных стен с грунтовой средой, по решению которой ведутся широкие исследовательские и проектные работы с целью совершенствования конструкций тонких подпорных стенок, является разработка методов и способов уменьшения бокового давления грунта. Новыми конструкциями, отвечающими указанным требованиям, являются анкерно-контрфорсные элементы подпорных стен, расположенные со стороны грунтовой засыпки и заземленные в ней.

Таким образом, разработка технических решений анкерно-контрфорсных элементов тонких подпорных стен, исследование особенностей их взаимодействия с грунтовой засыпкой и разработка инженерных методов расчета таких конструкций представляют собой актуальную задачу.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Изучению давления грунта на жесткие и гибкие, незаанкеренные и заанкеренные стенки посвящены работы Б.А. Савко, Г.Е. Лазебника, А.Д. Соколова [1, 2, 3]. Менее изучен вопрос работы контрфорсов. Угловые стенки с контрфорсами исследовали В.Н. Евстигнеев, В.С. Зеленский, А.Д. Соколов [4, 5, 6]. Целью экспериментальных работ В.Н. Евстигнеева и А.Д. Соколова было определение характера распределения давления грунта на стенку при наличии ребер жесткости, В.С. Зеленого – изучение общих деформаций сооружения и напряжений на контакте засыпки с элементами стенки.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Проведенные исследования не отражают всей специфики работы изучаемых конструкций. Лицевая стенка не рассматривалась как тонкая. Следовательно, вопрос относительно

исследования конструкции в виде тонкой стенки с контрфорсами (ребрами жесткости), расположенными со стороны грунтовой засыпки, является актуальным.

Постановка задачи. Разработано новое конструкторско-технологическое решение шпунтовой стенки [7] при использовании контрфорсных элементов в виде ребер жесткости, расположенных со стороны грунтовой засыпки, которые приводят к увеличению жесткости всей конструкции и уменьшению бокового давления грунта.

С целью внедрения нового технического решения в практику проектирования и строительства гидротехнических сооружений выполнены экспериментальные исследования бокового давления грунта засыпки на тонкую подпорную стенку с ребрами жесткости (контрфорсами).

Цель эксперимента – исследование взаимодействия бокового давления грунта с тонкой подпорной стенкой с ребрами жесткости (контрфорсами).

Задачи экспериментальных исследований:

– экспериментальным путем определить характер распределения давления грунта на тонкую стенку при наличии ребер жесткости;

– установить зависимость бокового давления грунта на стенку от геометрических параметров контрфорса;

– определить перемещения по высоте стенки.

Основной материал и результаты. Опыты проводились в лаборатории исследований и испытаний портовых гидротехнических сооружений при кафедре морских и речных портов, водных путей и их технической эксплуатации Одесского национального морского университета. Модель подпорной стенки с ребрами жесткости исследована в грунтовой лотке длиной 170 см, шириной 100 см, высотой 109 см. Боковыми стенками лотка служили листы полированного стекла толщиной 20 мм, опирающиеся на жесткий каркас лотка. Задняя стенка лотка представляла собой жесткую подпорную стенку, являющуюся плитой с ребрами жесткости, отлитой из алюминия. Передняя сторона была открыта на $\frac{3}{4}$ высоты лотка, что позволяло смоделировать грунт основания и облегчало работу с измерительной аппаратурой.

Модель подпорной тонкой стенки представляла собой стальной щит размером 100,5x99 см, толщиной 1,65 мм. Ребра жесткости были выполнены из той же стали прямоугольной и трапецидальной формы высотой 68 см. Ширина ребра прямоугольной формы равнялась 30 см, трапецидальной с расширением книзу составила 18 и 42 см (поверху и понизу соответственно), трапецидальной с расширением кверху – 42 и 18 см (поверху и понизу соответственно). Общий вид стенки, установленной в лотке, показан на рис. 1, а, б.

Материалом засыпки служил мелкозернистый кварцевый люберецкий песок, объемный вес которого $15,8 \text{ кН/м}^3$, угол внутреннего трения – 30° .

Стальной щит-модель был защемлен в грунт и имел две опоры, на которых измерялась результирующая сила давления песка, насыпанного в лоток.

Выбор схемы измерительной системы определяется точностью измерений и диапазоном измеряемых значений, а также характером и формой получения опытных данных.

Для изучения величины давления грунта на сооружение использовались различные измерительные устройства: интегральные датчики, индикаторы часового типа и манометр. По выполняемым функциям в грунтовой лотке установленные датчики разделяют на три группы: датчики для определения перемещения щита-модели по высоте, для определения суммарной горизонтальной составляющей величины давления грунта на щит-модель и для определения величины горизонтального давления грунта на щит-модель по высоте.



Рис. 1. Общий вид модели подпорной стенки:
а) вид сверху – подпорная стенка с двумя ребрами жесткости;
б) вид сбоку – подпорная стенка с одним ребром жесткости

Для оценки достоверности результатов построены эпюры бокового давления грунта на стенку (рис. 2) без ребер жесткости (кривая 1), полученные опытным путем и построенные по методу Ш. Кулона (кривая 2). Анализ эпюр показывает хорошее качественное и близкое количественное совпадение результатов.

Увеличение давления на нижнем датчике связано со смещением стенки верхним концом от грунта и смещении ее нижнего конца на грунт, вследствие чего вызывается в грунте «отпорное» сопротивление.

На основании проведенных опытов получены эпюры давления на стенку с прямоугольными ребрами жесткости, с ребрами жесткости с расширением книзу и с ребрами жесткости с расширением кверху (рис. 3).

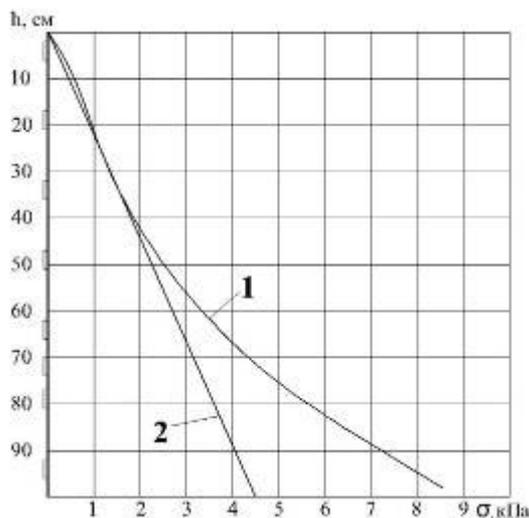


Рис. 2. Эпюры давления на стенку без ребер жесткости:
1 – по эксперименту;
2 – по методу Ш. Кулона

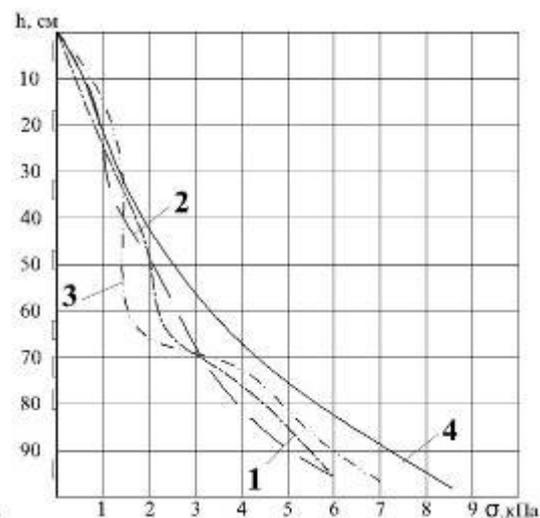


Рис. 3. Эпюры давления на стенку с различными формами ребер жесткости:
1 – прямоугольная форма;
2 – с расширением книзу;
3 – с расширением кверху; 4 – без ребер жесткости

Анализ полученных данных показывает, что применение ребер жесткости в стенке уменьшает давление на 26,7% при прямоугольной форме ребер жесткости, на 32,8% при ребрах жесткости с расширением книзу и на 21,8% при ребрах жесткости с расширением сверху по сравнению со стенкой с анкерами.

Форма эпюр давления на стенку с различными ребрами жесткости, повторяющая очертания треугольника, указывает на то, что стенка с ребрами жесткости работает по схеме консольной балки, защемленной в упругом основании (ниже уровня дна).

При рассмотрении стенки с ребрами жесткости с расширением книзу и прямоугольными ребрами жесткости при различном шаге ребер s (15, 30, 45 см) были получены эпюры давления грунта, представленные на рис. 4, 5. При шаге $s = 15$ см суммарное давление силовых датчиков составило $E = 0,339$ кН (0,302 кН); при $s = 30$ см $E = 0,381$ кН (0,415 кН); при $s = 45$ см $E = 0,520$ кН (0,474 кН).

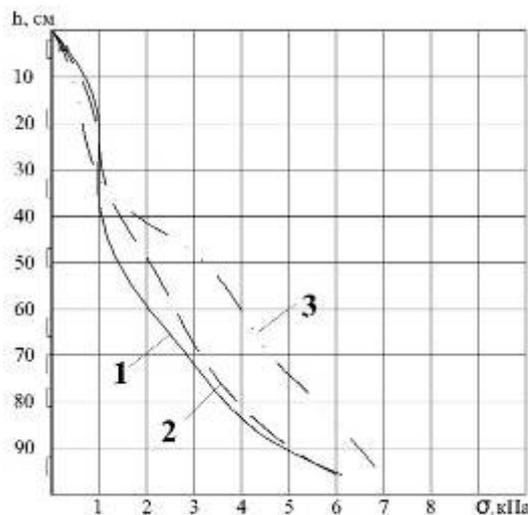


Рис. 4. Эпюра давления на стенку с ребрами с расширением книзу с различным шагом:
1 – 15 см, 2 – 30 см, 3 – 45 см

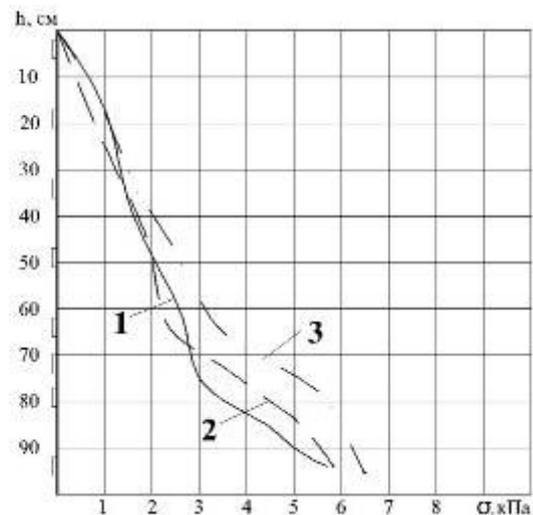


Рис. 5. Эпюра давления на стенку с прямоугольными ребрами жесткости с различным шагом:
1 – 15 см, 2 – 30 см, 3 – 45 см

В результате лабораторных опытов на рисунках 6 и 7 получены эпюры перемещений по высоте стенки при различных формах ребер жесткости без учета поверхностной нагрузки и с ее учетом.

Анализ эпюр показывает, что стенка с формой ребер жесткости с расширением книзу получила наибольшие перемещения ее верха, что произошло из-за наименьшей изгибной жесткости в сечении на уровне верха стенки по сравнению с другими стенками.

Для дополнительного представления о влиянии изгибной жесткости сечения были рассмотрены стенки с двумя прямоугольными ребрами жесткости при $v=s=30$ см (2 шт.), стенка с прямоугольной формой ребер с шириной и шагом $v=s=15$ см (4 шт.) и стенка с прямоугольной формой ребер $v=s=60$ см (1 шт.). При этом изгибная жесткость составила: $EI_1=4,43 \cdot 10^3$ кНм²; $EI_2=1,12 \cdot 10^3$ кНм²; $EI_3=17,93 \cdot 10^3$ кНм².

Суммарное давление силовых датчиков для первого случая составило 0,415 кН (0,576 кН – при приложении нагрузки); для второго – 0,460 кН (0,607 кН); для третьего – 0,352 кН (0,530 кН). Эпюры давления грунта и перемещения по высоте стенки представлены на рис. 8, 9.

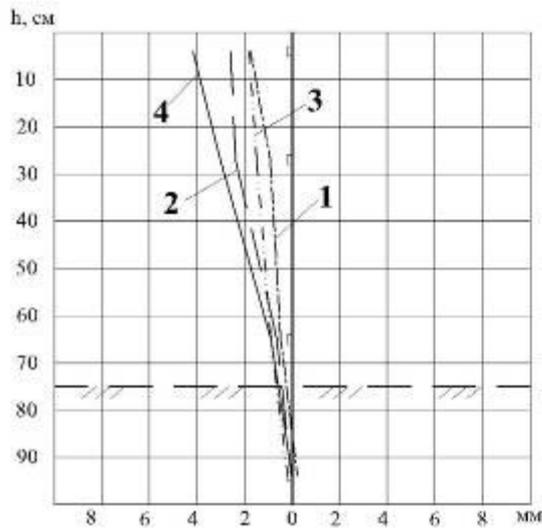


Рис. 6. Эпюры перемещений на стенку с различными формами ребер жесткости без учета поверхностной нагрузки:
 1 – прямоугольная форма;
 2 – с расширением книзу;
 3 – с расширением кверху;
 4 – без ребер жесткости

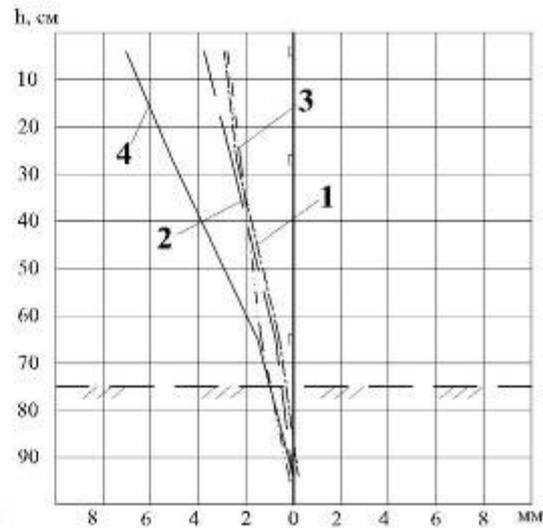


Рис. 7. Эпюры перемещений на стенку с различными ребрами жесткости при учете поверхностной нагрузки:
 1 – прямоугольная форма;
 2 – с расширением книзу;
 3 – с расширением кверху;
 4 – без ребер жесткости

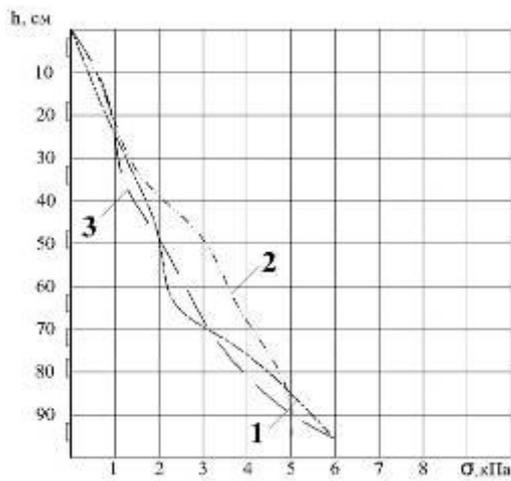


Рис. 8. Эпюры давления на стенку с прямоугольной формой ребер жесткости при различной изгибной жесткости: $EI_1 = 4,43 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$;
 $EI_2 = 1,12 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$; $EI_3 = 17,93 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$

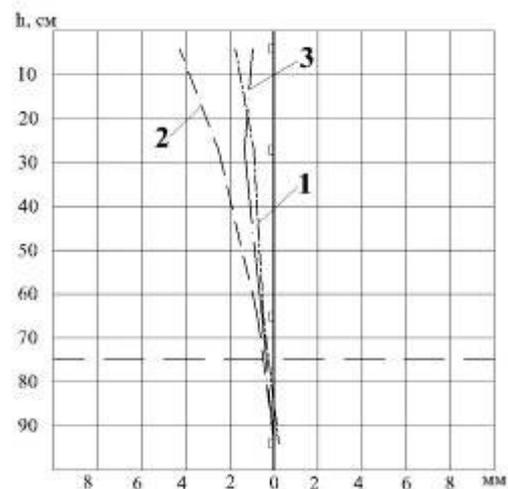


Рис. 9. Эпюры перемещений на стенку с прямоугольной формой ребер жесткости при различной изгибной жесткости: $EI_1 = 4,43 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$;
 $EI_2 = 1,12 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$; $EI_3 = 17,93 \cdot 10^3 \text{ кНм}^2$

На основании полученных эпюр можно сделать вывод, что увеличение изгибной жесткости значительно сказывается на поведении стенки – уменьшает ее перемещения по высоте и за счет увеличения боковой поверхности контрфорсов уменьшает давление грунта на стенку.

Полученные в лабораторных условиях опытные данные не могут в полной мере отражать сложные условия взаимодействия между тонкой подпорной стенкой с контрфорсами и грунтом, возникающие на практике. Однако на основании проведенных опытов представляется возможным сделать следующие **выводы**:

1. При использовании ребер жесткости в тонкой подпорной стенке давление грунта на лицевую стенку уменьшается.

2. При трапецидальной форме ребер жесткости с расширением книзу наблюдается наибольшее снижение давления грунта на лицевую стенку.

3. Наименьшие перемещения верха подпорной стенки получила стенка с формой ребер с расширением кверху.

Литература

1. Савко, Б.А. Методика определения допускаемых нагрузок на тонкостенные причальные сооружения в условиях Крайнего Севера / Б.А. Савко, В.А. Будин // Путьевые и изыскательские работы на реках Сибири: сб. научных трудов НИИВТ. – Новосибирск, 1983. – С. 71 – 83.
2. Лазебник, Г.Е. Давление грунта на сооружения / Г.Е. Лазебник. – К., 2005. – 243 с.
3. Соколов, А.Д. Давление грунта на подпорные сооружения с контрфорсами со стороны грунтовой засыпки от временных нагрузок на ее поверхности / А.Д. Соколов // Тр. Моск. гос. ун-та природообустройства. Вып.2 «Вопросы строительной механики, огнестойкости конструкций и гидравлики». – М.: МГУП, 2004. – С. 48 – 70.
4. Евстигнеев, В.Н. Экспериментальное изучение давления грунта на стенку с контрфорсами / В.Н. Евстигнеев // Портовое гидротехническое строительство. – 1967. – № 15. – С. 23 – 28.
5. Зеленский, В.С. Результаты лабораторных исследований набережной уголкового типа с наклонными анкерами / В.С. Зеленский // Труды Союзморниипроекта. – 1967. – № 17 (23). – С. 18 – 22.
6. Соколов, А.Д. Облегченные подпорные стены с ребристой напорной гранью / А.Д. Соколов // Транспортное строительство. – 2006. – № 8. – С. 20 – 24.
7. Пат. № 84888. Україна. МПК(2006) E02D 29/2, E02B 3/06. Підпірна стінка / Г.В. Слободяник, М.П. Дубровський; Одеський національний морський університет. – Заяв. 29.05.2006 від. 10.12.2008. – Бюл. №23. – 4 с.

© Н.Н. Хонелия, И.Н. Мироненко, А.В. Слободяник, Р.Р. Багратиони
Надійшла до редакції 13.02.2015