

М.П. Дубровский, д.т.н., профессор

В.Т. Оганесян, аспирант

Одесский национальный морской университет

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНЫХ ОПОР БОЛЬВЕРКОВ

Рассмотрено инновационное решение анкерных опор тонкостенных причальных сооружений, выполненных в виде гребёнки, что улучшает эксплуатационные качества и сокращает сроки строительства сооружения в целом. Приведены результаты численного анализа этого решения.

Ключевые слова: анкерная тяга, анкерная плита, больверк, несущая способность, материалоемкость.

М.П. Дубровський, д.т.н., професор

В.Т. Оганесян, аспірант

Одеський національний морський університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ АНКЕРНИХ ОПОР БОЛЬВЕРКІВ

Розглянуто інноваційне рішення анкерних опор тонкостінних причальних споруд, виконаних гребінчастими, що поліпшує експлуатаційні якості та скорочує терміни будівництва споруди в цілому. Наведено результати чисельного аналізу цього рішення.

Ключові слова: анкерна тяга, анкерна плита, больверк, несуча здатність, матеріаломісткість.

M.P. Doubrovsky, D.Sc., Professor

V.T. Oganesyanyan, postgraduate student

Odessa National Marine University

THE IMPROVEMENT OF OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ANCHORAGE BEARINGS OF SHEET-PILE BERTHS

The innovative solution of anchor bearings of sheet-pile walls, which are formed as a comb are considered. Such approach improves their operational qualities and shortens the construction of the structure in general. The investigation results of numerical analysis of this solution are shown.

Keywords: tie-rod, anchor plate, sheet-pile wall, bearing capacity, consumption of materials.

Введение. Сегодня в гидротехническом строительстве и проектировании всё чаще возникает вопрос о необходимости увеличения глубины воды у причалов в современных украинских портах. Это обусловлено тем, что с развитием воднотранспортной отрасли растут грузопотоки, увеличиваются объёмы перевозок и размеры судов (таких, как пост-панамакс и супер-пост-панамакс), а соответственно растут и глубины у причалов, обслуживающих эти суда.

Обычно возведение таких причальных сооружений (с глубиной воды 13 м и выше) сопряжено с большим расходом материалов, энергетических

ресурсов, применением мощного монтажного и сваебойного оборудования, сложностью монтажа и увеличением сроков строительства.

В связи с этим, вопросы повышения несущей способности и рационального использования имеющихся ресурсов являются ключевыми при проектировании и строительстве современных глубоководных терминалов.

В данной статье рассмотрено инновационное решение для причальных сооружений типа «больверк», разработанное в Одесском национальном морском университете на кафедре морских и речных портов, водных путей и их технической эксплуатации.

Обзор последних источников исследований и публикаций. Причальные сооружения в виде тонких стенок, благодаря своей экономичности и сравнительно небольшой чувствительности к перегрузкам, получили широкое распространение и применяются практически везде, где грунты основания допускают погружение шпунта и свай на необходимую глубину. Конструктивно сооружения такого типа постоянно совершенствуют, применяя при увеличении глубин и категории нагрузок новые виды шпунтов и новые виды анкерных опор. В связи с этим, при проектировании больверков одной из важных задач является определение рациональных габаритов анкерной тяги и анкерной опоры.

Широко распространённая конструкция причала типа «больверк» включает в себя лицевую шпунтовую стенку, обратную грунтовую засыпку за стенкой и расположенные в засыпке за призмой обрушения грунта анкерные тяги с анкерными плитами (рис.1).

Недостатком такого сооружения является значительная материалоёмкость анкерного устройства, так как при больших анкерных усилиях высота анкерных плит значительно возрастает. Во многих случаях приходится крепить анкера к плитам с помощью водолазов, что ведет к усложнению и удорожанию работ. Следует отметить также неудобство, вызванное необходимостью ведения монтажа анкерных плит в траншее для обеспечения ее устойчивости до засыпки грунтом.

Обычно сооружения такого типа проектируют и возводят таким образом, чтобы длина анкерной тяги была минимальной, а несущая способность анкерного устройства – максимальной. Это достигается за счет того, что длину анкерной тяги L_a (рис. 1) определяют как сумму горизонтальных проекций основания призмы обрушения грунта за лицевой стенкой L_1 и основания призмы выпора грунта перед анкерной опорой L_2 . Характерным недостатком для этого типа причальных набережных является то, что зона грунта III между призмами обрушения (зона I) и выпора грунта (зона II), что находится в естественном напряженном состоянии (состояние покоя), не используется для участия в работе по обеспечению несущей способности анкерной опоры. Реакцию грунта перед анкерной плитой обычно отображают эпюрой отпор грунта (рис. 1).

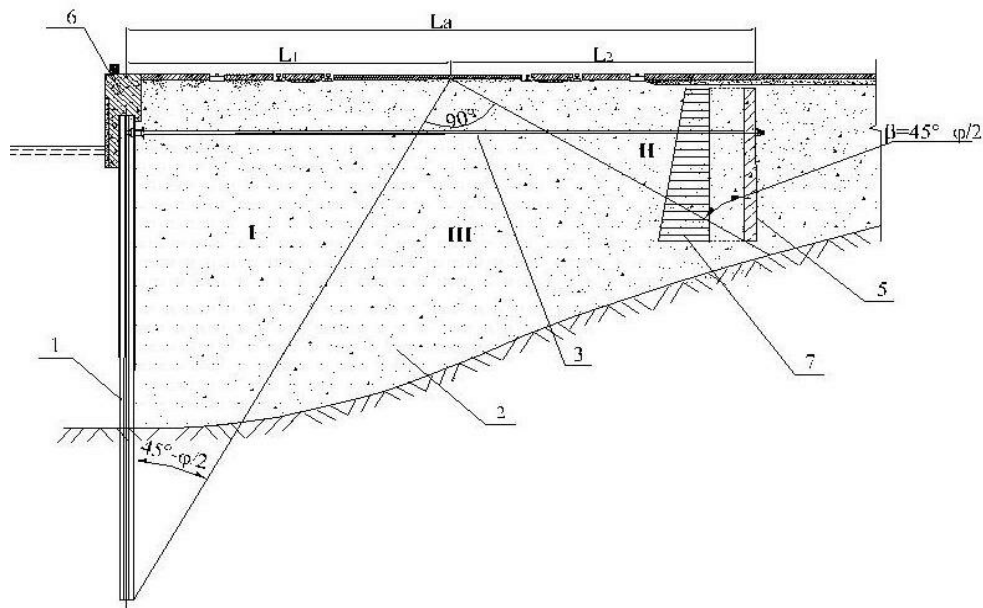


Рис. 1. Типовая конструкция больверка с эпюрой отпора грунта перед анкерной плитой

Постановка задачи. Предложенное инновационное решение предусматривает его применение как при создании новых причальных сооружений, так и при реконструкции уже существующих причальных набережных.

В основу данного предложения поставлена задача создания более экономичного типа анкерных опор, удовлетворяющих технические требования, предъявляемые к сооружениям такого типа. Причальное сооружение имеет лицевую стенку, обратную грунтовую засыпку за стенкой и расположенные в засыпке за призмой обрушения грунта засыпки анкерные тяги с анкерными опорами. Анкерные опоры выполнены гребенчатыми в виде закрепленных вдоль жёсткого сердечника анкерных плит, причем расстояние между смежными анкерными плитами такое, что более близкая к лицевой стенке плита не пересекает границ призмы выпора грунта перед более отдалённой от лицевой стенки плитой (призмы выпора грунта могут быть проведены под углом $45^\circ + \varphi/2$ к вертикали, где φ – угол внутреннего трения грунта).

Основной материал и результаты. Благодаря предложенному подходу обеспечивается меньшая материалоемкость (при той же несущей способности, что и в известных технических решениях). С другой стороны, предложенная конструкция может обеспечить более высокую несущую способность сооружения (при той же материалоемкости, что и в известных технических решениях), за счёт чего улучшаются эксплуатационные показатели причального сооружения.

Шпунтовая стенка 1 работает под влиянием распорного давления грунта засыпки 2, как балочная плита, верхний конец которой шарнирно прикреплен к анкерному устройству, а нижний зажат в грунте (рис. 2). Стенка 1, перемещение верхнего конца которой ограничено анкерным

устройством, под давлением грунта засыпки 2 прогибается и стремится обернуться вокруг точки крепления к ней анкерной тяги 3. Этому препятствует сопротивление грунта дна, расположенного перед стенкой. Анкерная тяга 3 передаёт усилие от давления грунта на анкерную опору, выполненную в виде «гребёнки». Это усилие воспринимается одновременно всеми плитами «гребёнки» 5.

Реакция грунта (отпор) перед анкерными плитами в «гребёнке» отражена эпюрами отпора грунта (позиция 7 на рис. 2). В зависимости от количества плит в «гребёнке» и их размеров суммарный отпор грунта перед ними может быть таким же или превышать отпор перед анкерной плитой в традиционных решениях (в частности более близкая к лицевой стенке анкерная плита «гребёнки» может использовать отпорную способность грунта в зоне III, см. рис. 2).

Ниже приведен пример расчёта, подтверждающий вышеприведённые соображения. При численном моделировании причала было определено оптимальное положение плит «гребёнки» по высоте и получена зависимость материалоемкости от несущей способности.

В качестве исходных данных была принята причальная стенка с унифицированной (проектной) глубиной воды у сооружения 9,75 м, выполненная из металлического шпунта корытного профиля. Анкерная плита согласно традиционному решению выполнена из железобетона, имеет высоту $h=3$ м и заглублена на расстояние $T=2$ м от поверхности причала. За стенкой отсыпан песок средней крупности с углом внутреннего трения $\varphi=30^\circ$ и удельным весом $\gamma=20$ кН/м³. Используя основные зависимости закона Кулона, находим расчетное значение равнодействующей силы пассивного давления грунта (отпор грунта) для одиночной анкерной плиты традиционной конструкции причала $E_{оп}$ (на 1 м длины причала).

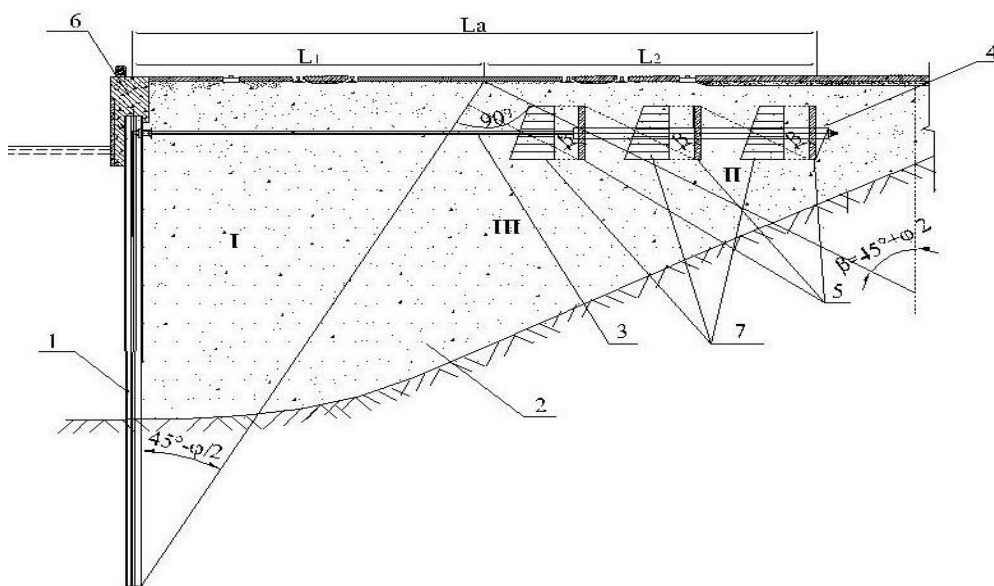


Рис. 2. Причальное сооружение с эпюрами отпора грунта перед анкерными плитами в виде «гребёнки»

$$E = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} h = \frac{g \times T \times K_p + g(T+h)K_p}{2} h = \frac{2g \times T \times K_p + g \times h \times K_p}{2} h =$$

$$= \gamma \times T \times K_p \times h + 0,5h \times \gamma h \times K_p = \gamma \times K_p \left[T \times h + 0,5h^2 \right], \quad (1)$$

где K_p – коэффициент пассивного давления грунта засыпки.

При $\varphi = 30^\circ$

$$K_p = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) = \operatorname{tg}^2 60^\circ = 3; \quad (2)$$

$$\sigma_1 = \gamma \times T \times K_p; \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \gamma \times (T+h) \times K_p. \quad (4)$$

Подставляя исходные данные в формулу (1), получаем $E_{оп} = 630$ кН – несущая способность анкерной плиты.

Вычислим анкерную несущую способность предложенного причального сооружения в зависимости от количества плит в «гребёнке», их размера (считая их толщину равной толщине анкерной плиты в известной конструкции), варьируя их размещение по глубине в грунте засыпки относительно высоты плиты в традиционной конструкции причала. Для того чтобы определить оптимальное положение «гребёнки», рассмотрим три положения предложенного анкерного устройства по глубине: в верхней трети анкерной плиты традиционной конструкции причала (верхнее положение), средней трети анкерной плиты традиционной конструкции причала (среднее положение) и в нижней трети анкерной плиты традиционной конструкции причала (нижнее положение). Результаты расчёта сведены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость несущей способности от заглубления и количества плит анкерных опор усовершенствованной и типовой конструкций

Количество плит n «гребёнки»	Высота h одной плиты, м	Верхнее положение		Среднее положение		Нижнее положение	
		Несущая способность одной плиты $E_{оп}$ известной конструкции причала, кН	Несущая способность E плит «гребёнки», кН	Несущая способность одной плиты $E_{оп}$ известной конструкции причала, кН	Несущая способность E плит «гребёнки», кН	Несущая способность одной плиты $E_{оп}$ известной конструкции причала, кН	Несущая способность E плит «гребёнки», кН
1	3	630	630	630	630	630	630
2	1,5	247,5	495	315	630	382,5	765
3	1	150	450	210	630	270	810
6	0,5	67,5	405	105	630	142,5	855

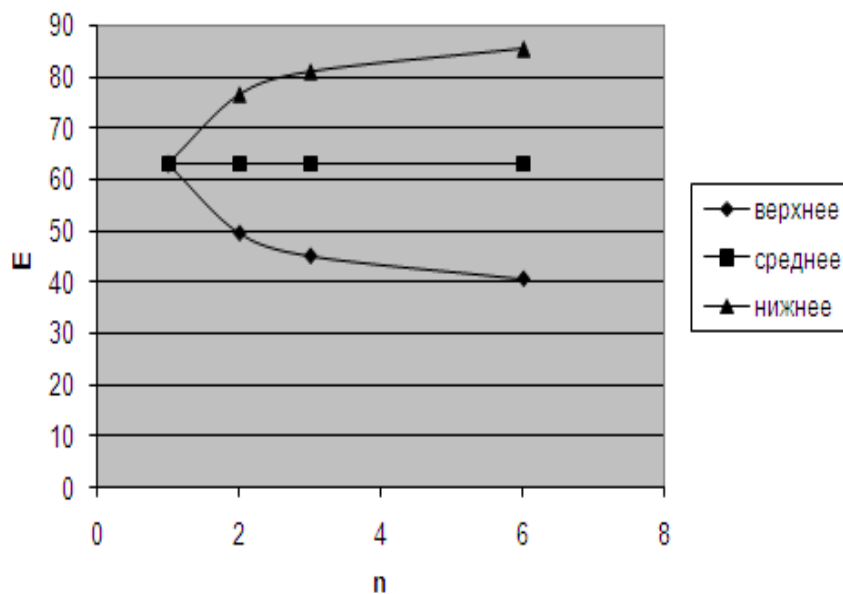


Рис. 3. Графики зависимости несущей способности «гребёнки» (E) от количества плит (n) при верхнем, среднем и нижнем положениях плит

Графики зависимости несущей способности «гребёнки» (E) от количества плит (n) для трёх рассмотренных положений плит по глубине (рис. 3) показывают, что при среднем положении «гребёнки» значение несущей способности соответствует традиционному решению. При нижнем положении «гребёнки» наблюдается значительное увеличение несущей способности при таких же затратах материала, как и в традиционном решении.

В ходе численного моделирования были определены зависимость высоты (h) одной плиты «гребёнки» от заглубления относительно поверхности грунта засыпки (T), а также зависимость высоты (h) одной плиты «гребёнки» от количества плит n . Результаты расчетов приведены в сравнительной табл. 2 и отражены на графиках (рис. 4, 5). В табл. 2 E_1 , h_1 – значения несущей способности и высоты плит «гребёнки» соответственно при одинаковых затратах материала на изготовление анкерных устройств в типовом и предложенном решениях; E_2 , h_2 – значение несущей способности и высоты плит «гребёнки» соответственно при уменьшении расхода материала по предложенному решению (при такой же несущей способности, как в типовом и предложенном решениях).

Таблица 2. Сравнительная таблица основных параметров анкерных опор усовершенствованной и типовой конструкций

T , м	n	E_1 , кН	h_1 , м	E_2 , кН	h_2 , м
2	1	630	3	630	3
3,5	2	765	1,5	630	1,133141
4	3	810	1	630	0,694254
4,5	6	855	0,5	630	0,320436

Выводы. Таким образом, при одинаковой потребности в материале несущая способность E_1 анкерного устройства в соответствии с предложенным решением превышает несущую способность, обеспечиваемую традиционной конструкцией.

С другой стороны, при одинаковой несущей способности известной конструкции и предлагаемого технического решения ($E_2=630$ кН) потребность в материале анкерных плит в случае «гребёнки» уменьшается: вместо традиционного решения в виде одной плиты высотой $h_1=3$ м можно использовать «гребёнку» из двух плит высотой $h_2 = 1,13$ м каждая (экономия материала 25%) или «гребёнку» из трех плит высотой $h_2 = 0,69$ м каждая (экономия материала 31%), или «гребёнку» из шести плит высотой $h_2 = 0,32$ м каждая (экономия материала 57%).

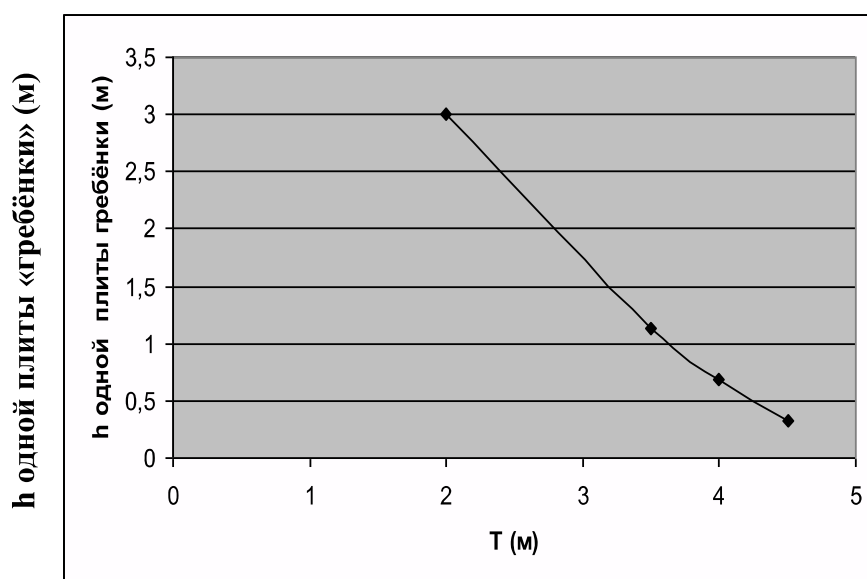


Рис. 4. График зависимости высоты (h) анкерных плит «гребёнки» от глубины (T) их размещения

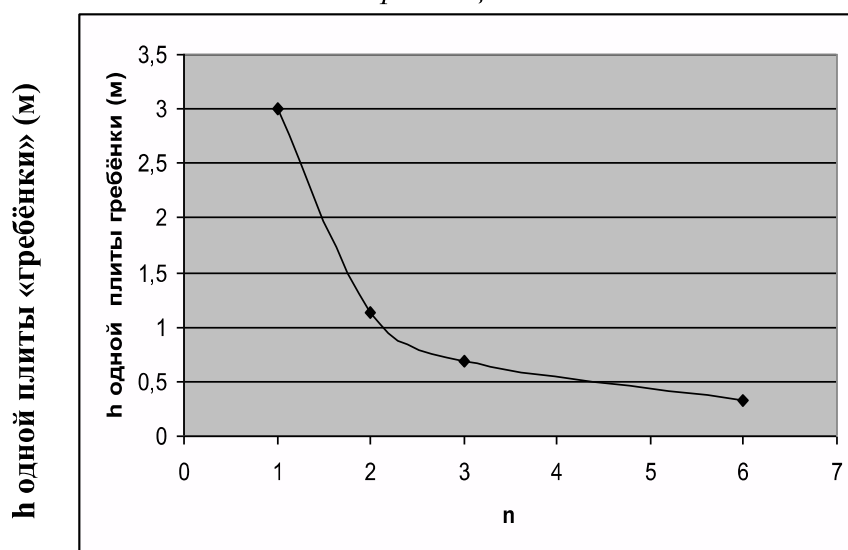


Рис. 5. График зависимости высоты (h) анкерных плит «гребёнки» от их количества (n)

Следовательно, появляется возможность обеспечить требуемое значение несущей способности анкерного устройства при существенной экономии материала либо при сохранении обычного расхода материала значительно увеличить несущую способность анкерного устройства для глубоководных причальных стенок.

Дальнейшие исследования в рассматриваемом направлении могут быть сконцентрированы на физическом моделировании работы анкерной плиты в виде «гребёнки», а также на расширении видов «гребёнчатых» анкерных опор (например, с наклоном плит от вертикали, с плитами различной высоты, с размещением сердечника «гребёнки» под углом к горизонту).

Литература

1. Будин, А.Я. *Набережные* / Будин А.Я., Демина Г.А. // *Справочное пособие* – М.: Стройиздат, 1979. – 220 с.
2. Гуревич, В.Б. *Речные портовые гидротехнические сооружения* / Гуревич В.Б. – М.: Транспорт, 1969. – 416 с.
3. *Инновационные конструкторско-технологические решения глубоководных гидротехнических сооружений свайной конструкции* / Дубровский М.П., Литвиненко В.В., Оганесян В.Т., Дубровская О.М. // *Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування»*. – Вип. 75, Кн. 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С.378 – 383.
4. *Ресурсосберегающие и энергоэффективные конструкторско-технологические решения для портовой гидротехники* / Дубровский М.П., Калюжная В.Е., Оганесян В.Т. // *XII виставка-конференція «Інтер-транспорт»*, 2013. – С. 366 – 369.

*Надійшла до редакції 25.09.2013
© М.П. Дубровський, В.Т. Оганесян*