

Научная статья

УДК 627.142.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-159-174

Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор

С.В. Посыпанов[✉], *д-р техн. наук, проф.*; *ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

К.В. Козлов, аспирант; *ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Поступила в редакцию 04.03.24 / Одобрена после рецензирования 19.05.24 / Принята к печати 24.05.24

Аннотация. В настоящее время актуальным является вопрос доставки древесного сырья из удаленных лесных массивов, где находятся его наиболее крупные объемы. Зачастую эта доставка экономически оправдана только при использовании сети средних и малых рек с применением экологически безопасных технологий. На таких реках предпочтительно для крепления лесосплавных объектов использование мобильных, в частности береговых наполняемых, опор. Приведено описание новой модификации такой опоры, отличающейся от прототипа емкостью, имеющей гибкую оболочку. Это позволяет существенно уменьшить расход материала на создание емкости, габариты опоры в транспортном положении, изготавливать опоры любого реалистичного размера. Выбор наиболее рационального варианта такой емкости предполагает научное обоснование ее параметров. Цель исследования – разработка научных основ для этого обоснования. Теоретическим путем получены аналитические формулы для определения основных геометрических характеристик поперечного сечения рассматриваемой емкости. Данные формулы полезны при научных исследованиях, однако их применение очень проблематично в рамках практических инженерных расчетов. Это объясняется зависимостью указанных характеристик в них от эллиптических интегралов и параметров, которые в инженерной практике измерить очень сложно. Выполнив вычисления по этим формулам для единичной площади поперечного сечения, получили его удельные геометрические характеристики при различных формах, т. е. при различных отношениях ширины к высоте наполняемой емкости. Результатами расчетов стали аппроксимирующие зависимости, связывающие названные характеристики с указанным отношением – коэффициентом формы. Умножение удельных характеристик на квадратный корень площади поперечного сечения дает абсолютные значения соответствующих характеристик. Итогом стали удобные для практического использования формулы, позволяющие определять ширину и высоту наполняемой емкости, ширину ее основания, периметр поперечного сечения, высоты линии нулевого давления и крайней боковой точки сечения над основанием емкости. Точности вычислений по этим и аналитическим формулам почти одинаковы. Получена формула для определения удельного натяжения гибкой оболочки емкости. Установлены характер и степень влияния коэффициента формы и длины емкости на ее другие геометрические характеристики. Разработан алгоритм обоснования ключевых параметров наполняемой емкости, имеющей гибкую оболочку, с применением описанных результатов.

© Посыпанов С.В., Козлов К.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: лесосплав, мобильная опора, наплавные сооружения, крепление плотов, наполняемая емкость, гибкая оболочка

Для цитирования: Посыпанов С.В., Козлов К.В. Инженерный расчет гибких оболочек лесосплавных опор // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 159–174. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-159-174>

Original article

The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors

Sergey V. Posypanov[✉], Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [ABF-6542-2021](https://orcid.org/0000-0003-0600-7089), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0600-7089>

Konstantin V. Kozlov, Postgraduate Student; ResearcherID: [JFA-2045-2023](https://orcid.org/0009-0003-8892-5867), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8892-5867>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.posypanov@narfu.ru[✉], kozlovkonstantin94@gmail.com

Received on March 4, 2024 / Approved after reviewing on May 19, 2024 / Accepted on May 24, 2024

Abstract. Currently, the issue of delivering wood raw materials from remote forest areas, where the largest volumes are located, is relevant. Often, this delivery is economically justified only when using a network of medium and small rivers with the use of environmentally friendly technologies. On such rivers, it is preferable to use mobile anchors, in particular shore fillable ones, for fixing timber-rafting objects. A description has been given of a new modification of such an anchor, which differs from the prototype by a container having a flexible shell. This allows to significantly reduce the material consumption for manufacturing the container, the dimensions of the anchor in the transport position, and to produce anchors of any realistic size. The choice of the most rational option for such a container implies the scientific justification of its parameters. The aim of the study is to develop a scientific basis for this justification. Analytical formulas have been theoretically obtained for determining the basic geometric characteristics of the cross-section of the container under consideration. These formulas are useful in scientific research, but their application is very problematic in practical engineering calculations. This is due to the dependence of the specified characteristics on elliptic integrals and parameters, which are very difficult to measure in engineering practice. Having performed calculations using these formulas for a single cross-sectional area, we have obtained its specific geometric characteristics for various shapes, i.e. for various width-to-height ratios of a container to be filled. The results of the calculations have been approximating dependencies linking the named characteristics with the specified ratio, which is called the shape factor. Multiplying the specific characteristics by the square root of the cross-sectional area gives the absolute values of the corresponding characteristics. As a result, we have obtained formulas convenient for practical use, allowing to determine the width and height of the container to be filled, the width of its base, the perimeter of the cross-section, the heights of the zero pressure line and the extreme lateral point of the cross-section above the base of the container. The accuracy of calculations based on these and analytical formulas is almost the same. A formula for determining the specific tension of a flexible container shell has been obtained. The nature and degree of influence of the shape factor and length of the container on its other geometric



characteristics have been established. An algorithm for substantiating the key parameters of a container to be filled with a flexible shell has been developed using the described results.

Keywords: timber rafting, mobile anchor, floating structures, raft holding, container to be filled, flexible shell

For citation: Posypanov S.V., Kozlov K.V. The Engineering Calculation of Flexible Shells of Timber-Rafting Anchors. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 159–174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-159-174>

Введение

Основные запасы древесного сырья в крупных лесных регионах находятся на большом расстоянии от перерабатывающих центров. Во многих случаях доставка этого сырья потребителям экономически оправдана только по водным путям с задействованием развитых сетей средних и малых рек регионов. При этом предполагается использование новых, экологически безопасных технологий водного транспорта. По ряду причин, описанных в работах [5, 6, 11], на таких реках для крепления лесотранспортных единиц и наплавных сооружений рекомендуется применение легко перемещаемых мобильных опор с небольшой стоимостью, которые можно было бы монтировать и демонтировать в местах, недоступных для транспорта. Во многих случаях такие опоры более предпочтительны и на крупных реках. Соответствующая конструкция опоры рассмотрена нами в работе [11], посвященной главным образом обоснованию держащей силы опоры. В число основных составляющих этой опоры входят наполняемые емкости, роль которых играют так называемые еврокубы [4, 20]. Их приобретают в готовом виде, большая доработка не требуется. В этом состоит преимущество таких емкостей. Однако альтернативой здесь во многих случаях являются наполняемые емкости с гибкой оболочкой. Опоры с подобной емкостью более компактны в разобранном состоянии, для их производства нужно гораздо меньшее количество материала при одинаковых значениях держащей силы. Они могут быть изготовлены любого реалистичного размера без привязки к размерам еврокубов.

На рис. 1 приведено схематичное изображение опоры с наполняемой емкостью, имеющей гибкую оболочку. Несущее основание опоры состоит из пластин, к которым снизу прикреплены грунтозацепы. Пластины основания связаны между собой соединительными звеньями. Возможно соединение с помощью продольных стальных канатов, к которым крепятся секции грунтозацепов, по аналогии с предыдущей конструкцией, описанной в статье [11]. К пластине основания, расположенной со стороны водоема, с помощью такелажной скобы присоединяют крепежный канат, связывающий опору с удерживаемым наплавным объектом. Вертикальная нагрузка на пластины основания обеспечивается гибкой емкостью, которая заполняется водой. Наполняемая емкость может быть изготовлена, например, из поливинилхлорида (ПВХ) – UNISOL [13]. Наполнение емкости и слив воды из нее осуществляются через кран со стороны водоема. С боковых сторон к пластинам основания крепят через соединительные звенья тонкостенные гибкие листы защитного кожуха, которые могут быть выполнены, в частности, из оцинкованной стали. Из этого же материала изготовлены более узкие ленты межсекционных кожухов, охватывающие гибкую

емкость не только по бокам, но и снизу. После наполнения емкости плотное прилегание основных и межсекционных защитных кожухов к ней обеспечивается с помощью натяжных устройств, установленных сверху. При большой высоте опоры натяжные устройства могут быть расположены у пластин основания. С торцевых сторон опоры на пластинах основания шарнирно закреплены передняя и задняя пластины (на рис. 1, *a* шарниры не видны, находятся под кожухом). На передней пластине сделана прорезь для крана. Задняя пластина опирается на удлиненную часть задней пластины основания подкосным упором. Задняя и передняя пластины в верхней части соединяются стальным канатом, оснащенный натяжным устройством.

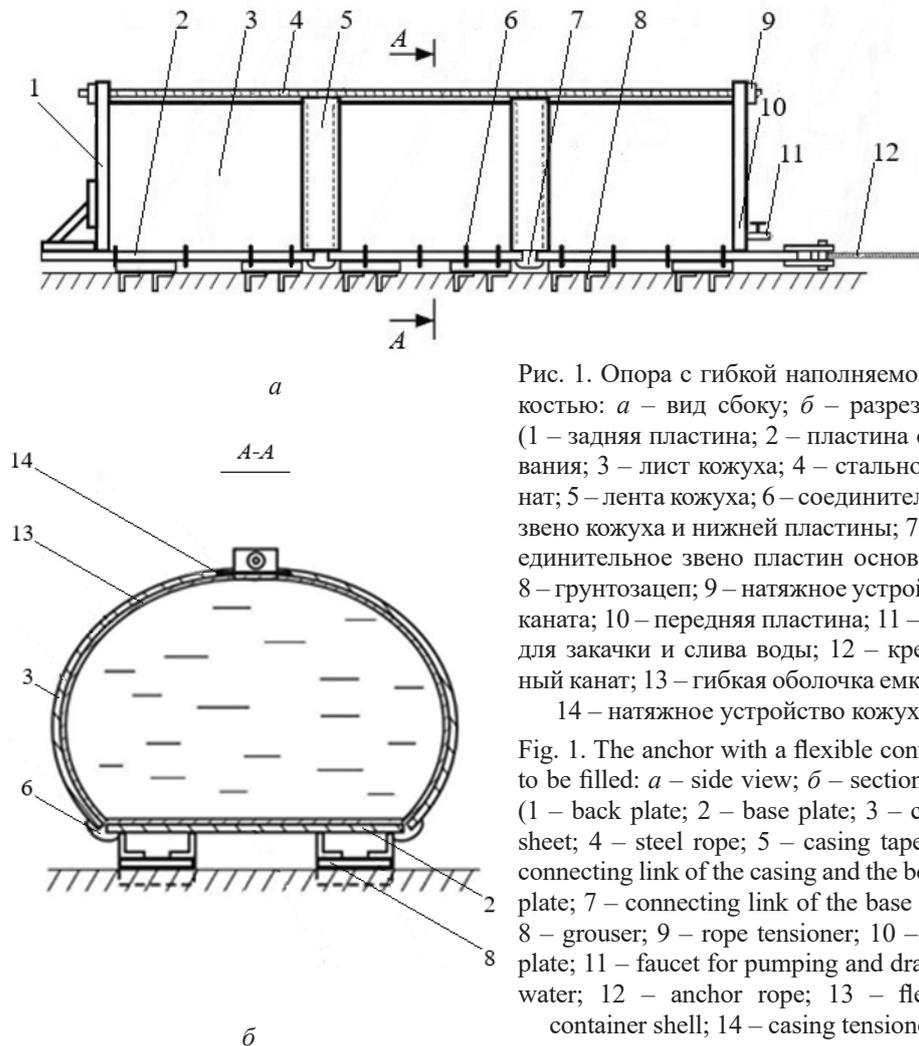


Рис. 1. Опора с гибкой наполняемой емкостью: *a* – вид сбоку; *б* – разрез *A-A* (1 – задняя пластина; 2 – пластина основания; 3 – лист кожуха; 4 – стальной канат; 5 – лента кожуха; 6 – соединительное звено кожуха и нижней пластины; 7 – соединительное звено пластин основания; 8 – грунтозацеп; 9 – натяжное устройство каната; 10 – передняя пластина; 11 – кран для закачки и слива воды; 12 – крепежный канат; 13 – гибкая оболочка емкости; 14 – натяжное устройство кожуха)

Fig. 1. The anchor with a flexible container to be filled: *a* – side view; *б* – section *A-A* (1 – back plate; 2 – base plate; 3 – casing sheet; 4 – steel rope; 5 – casing tape; 6 – connecting link of the casing and the bottom plate; 7 – connecting link of the base plate; 8 – grouser; 9 – rope tensioner; 10 – front plate; 11 – faucet for pumping and draining water; 12 – anchor rope; 13 – flexible container shell; 14 – casing tensioner)

Секционная конструкция обеспечивает лучшее прилегание основания опоры к поверхности грунта, в случае если площадка под ней недостаточно ровная. Кроме того, описанную опору можно разобрать на более мелкие составляющие, что особенно важно, когда к месту установки опоры затруднен или невозможен подъезд транспорта и составляющие необходимо переносить.

Перед установкой опоры на территории, где предполагается ее размещение, разравнивается площадка. На площадке монтируется основание опоры в проектное положение. К листам основания присоединяют листы кожуха, подкладывают ленты межсекционных кожухов. На основании опоры устанавливают пустую гибкую емкость. К крайним листам основания посредством шарниров присоединяют заднюю и переднюю пластины. Их приводят в вертикальное положение и с помощью стального каната соединяют между собой. Кран емкости вставляют в прорезь передней пластины. Посредством натяжных устройств соединяют листы, а затем ленты кожухов противоположных сторон. При этом натяжные устройства должны быть в раздвинутом, максимально ослабленном состоянии. С помощью переносного насоса закачивают через кран воду в гибкую емкость до достижения ею проектной формы. После этого с помощью натяжных устройств убирают зазоры между кожухами и заполненной емкостью. При необходимости дополнительно утягивают стальной канат, соединяющий переднюю и заднюю пластины.

После того как необходимость опоры на данном участке отпадет, ее можно разобрать и перевезти на другое место. При этом сливают воду через кран, разборку опоры осуществляют в порядке, обратном порядку сборки.

Основное принципиальное отличие данной конструкции от предыдущей заключается в присутствии наполняемой емкости. Для изготовления наиболее рационального варианта такой емкости необходимо научное обоснование ее параметров. Изучение литературы о береговых опорах [1, 2, 8–10, 12], в т. ч. обобщающего характера [10, 12], показало, что нужная для этого информация отсутствует. Для ее получения требуются дополнительные исследования.

Цель – разработка научных основ для обоснования параметров наполняемой емкости с гибкой оболочкой для мобильной береговой опоры.

Объект – наполняемая емкость с гибкой оболочкой для береговой опоры.
Метод – теоретический.

Результаты исследования и их обсуждение

При закачке воды в гибкую емкость она меняет форму поперечного сечения (рис. 2). При малом количестве воды сечение будет приплюснутым, т. е. низким и широким в случае отсутствия кожуха. С увеличением количества воды в емкости высота ее сечения будет возрастать, а ширина уменьшаться. Также уменьшится и ширина опорной поверхности. Вместе с тем увеличится напор, под которым необходимо подавать воду в емкость, а также натяжение гибкой оболочки емкости. Напор воды в емкости наглядно демонстрируется с помощью воображаемого пьезометра, подключенного к ней.

Геометрической фигурой, имеющей наибольшую площадь сечения при определенном периметре, является круг [7]. То есть именно при круглом сечении емкость будет характеризоваться наибольшим объемом. Ширина основания у гибкой емкости в данном случае равна 0. Для достижения этого условия потребуется бесконечно большое давление, в гибкой оболочке появится огромное натяжение. При нулевой ширине основания возникает вопрос о поперечной устойчивости опоры. Очевидно, что крайние варианты в данном случае не применимы. Обоснование параметров емкости должно выполняться с учетом необходимости обеспечения приемлемого давления в ней, натяжения в гибкой

оболочке, хорошего наполнения водой с учетом фактора поперечной устойчивости опоры.

Поперечное сечение оболочки наполняемой емкости (рис. 2) можно рассматривать как гибкую нить. Форма этой нити описывается 2 параметрическими уравнениями. Первое уравнение для координаты x в данном случае имеет вид

$$x = 0,5H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, \varphi) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, \varphi))), \quad (1)$$

где Θ – угол, определяющий форму рассматриваемой линии, ...°; $K(\Theta)$ и $F(\Theta, \varphi)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 1-го рода соответственно; $E(\Theta)$ и $E(\Theta, \varphi)$ – полный и неполный эллиптические интегралы 2-го рода соответственно [15].

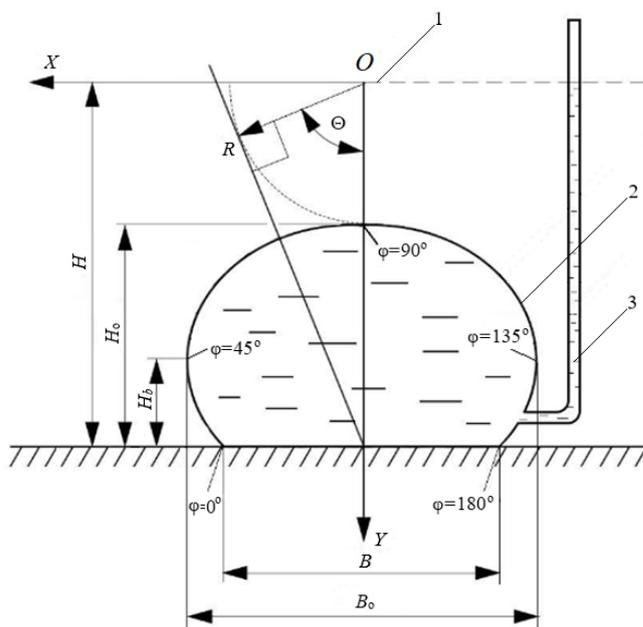


Рис. 2. Расчетная схема гибкой оболочки: 1 – линия нулевого давления; 2 – гибкая оболочка; 3 – воображаемый пьезометр (H – высота расположения линии нулевого давления над основанием емкости, м; H_0 – высота емкости, м; H_b – высота расположения крайней боковой образующей емкости, м; B_0 – ширина емкости, м; B – ширина основания емкости, м; Θ – угол, определяющий форму кривой, ...°; φ – параметр кривой, ...° [15])

Fig. 2. The design scheme of a flexible shell: 1 – zero pressure line; 2 – flexible shell; 3 – imaginary piezometer (H – height of the zero pressure line above the base of the container, m; H_0 – container height, m; H_b – height of the extreme lateral forming the container, m; B_0 – width of the container, m; B – width of the container base, m; Θ – angle determining the shape of the curve, ...°; φ – curve parameter, ...° [15])

Высота H функционально связана с размером рассматриваемой замкнутой линии (рис. 2). Величина Θ – угол треугольника, примыкающий к началу координат. Указанный треугольник образован фрагментом вертикальной оси

оболочки, фрагментом касательной, проведенной из середины сечения основания оболочки к окружности с центром в начале координат и радиусом, равным расстоянию от начала координат до верхней точки оболочки. Третьей стороной является отрезок, расположенный под прямым углом к касательной из начала координат. Как было отмечено, угол Θ определяет форму поперечного сечения наполняемой гибкой емкости. Чем ближе угол к 90° , тем более приплюснутой является указанная форма. Чем меньше угол, тем больше высота поперечного сечения и меньше ширина при постоянном периметре. Параметр φ изменяется вдоль поперечного сечения оболочки. Наиболее значимые его величины: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° – указаны на рис. 2.

При $\varphi = 45^\circ$, используя формулу (1), можем получить координату x крайней боковой точки поперечного сечения емкости. Так как сечение симметрично относительно оси OY , ширина емкости будет равна удвоенному значению указанной координаты. То есть для ширины емкости справедливо выражение

$$B_0 = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, 45^\circ) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, 45^\circ))). \quad (2)$$

Используя ту же формулу с учетом упомянутой симметричности при $\varphi = 0^\circ$, можем записать соответствующее выражение для ширины основания емкости:

$$B = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - F(\Theta, 0^\circ) - 2(E(\Theta) - E(\Theta, 0^\circ))).$$

Так как интегралы $F(\Theta, 0^\circ)$, $E(\Theta, 0^\circ)$ равны 0, привели полученное выражение к более простому виду:

$$B = H((2 - \sin^2\Theta)(K(\Theta) - 2E(\Theta))). \quad (3)$$

Второе параметрическое уравнение для рассматриваемой линии (рис. 2) имеет вид

$$y = H\sqrt{1 - \sin^2\Theta \sin^2\varphi}. \quad (4)$$

Координата y при $\varphi = 90^\circ$ соответствует верхней точке поперечного сечения емкости, при $\varphi = 0^\circ$ – нижней точке сечения емкости. Разность этих координат позволяет определить высоту емкости. Выполнив соответствующую подстановку и преобразования, получили формулу для определения высоты гибкой емкости:

$$H_0 = H(1 - \cos\Theta). \quad (5)$$

Разница координат y при $\varphi = 0^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$ дает высоту расположения крайней боковой образующей емкости. Соответствующее выражение, полученное после преобразований:

$$H_b = H\left(1 - \sqrt{1 - 0,5\sin^2\Theta}\right). \quad (6)$$

Также с использованием параметрических формул (1), (4) и известных приемов [7] по определению длин дуг и площадей сегментов плоских криволинейных геометрических фигур получили зависимости для периметра сечения гибкой наполняемой емкости

$$L = 2H(K(\Theta) - E(\Theta)) \quad (7)$$

и его площади

$$\Omega = H^2((2 - \sin^2\Theta)K(\Theta) - 2E(\Theta)). \quad (8)$$

Приведенные формулы позволяют определять основные геометрические параметры поперечного сечения гибкой наполняемой емкости. Однако применение их при решении практических задач проблематично. Это связано с тем, что искомые геометрические характеристики сечения определяются с помощью указанных формул по высоте H и углу Θ , измерение которых (рис. 2) в практических задачах нереально. Необходимость расчета эллиптических интегралов вносит дополнительные сложности в вычисления, создает проблемы при выражении одного геометрического параметра через другие. С учетом этого было принято решение, используя приведенные формулы, выполнить требуемые вычисления, и их результаты использовать для получения удобных в инженерной деятельности, достаточно простых и точных аппроксимирующих зависимостей, позволяющих устанавливать названные геометрические параметры на практике.

По аналогии с лесосплавными пучками [10] в данном случае ввели понятие коэффициента формы поперечного сечения емкости C . Этот коэффициент находится как отношение ширины емкости к ее высоте: он равен отношению правой части формулы (2) к соответствующей части формулы (5). После сокращения H с учетом того, что 45° – это постоянная величина, становится очевидным, что коэффициент формы C зависит только от угла Θ . Между ними существует однозначная связь, т. е. для каждого значения Θ есть определенное значение коэффициента формы C и наоборот. И та и другая величина определяют форму поперечного сечения емкости. Если при конкретном C менять величину площади сечения, то все его линейные размеры будут изменяться с сохранением пропорций. Учитывая это, упомянутые вычисления выполнили для единичной площади поперечного сечения емкости.

В случае равенства поперечного сечения емкости 1 формула (8) может быть приведена к виду

$$H = \frac{1}{\sqrt{(2 - \sin^2 \Theta) K(\Theta) - 2E(\Theta)}}.$$

Задавая различные значения угла Θ , в диапазоне от 45° до 87° , вычисляли соответствующие значения высоты H . Эллиптические интегралы здесь и далее определяли по таблицам [17]. При каждом принятом значении угла Θ и высоте H вычисляли по формулам (2), (3), (5) – (7) ширину наполняемой емкости, ширину ее основания, высоту, высоту расположения крайней боковой точки поперечного сечения емкости, периметр указанного поперечного сечения L . Путем деления ширины емкости на ее высоту находили коэффициент формы поперечного сечения емкости. Результаты расчетов приведены в таблице.

Результаты расчетов основных геометрических характеристик поперечного сечения наполняемой емкости с гибкой оболочкой при единичной площади поперечного сечения емкости

The results of calculations of the basic geometric characteristics of the cross-section of a container to be filled with a flexible shell for a single cross-sectional area of the container

Θ, \dots°	$H, \text{ м}$	$B_o, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	$H_o, \text{ м}$	$H_b, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	C
45	3,539	1,193	0,283	1,037	0,474	3,564	1,151
60	1,912	1,273	0,523	0,956	0,400	3,616	1,332
65	1,594	1,316	0,627	0,920	0,370	3,651	1,430
70	1,335	1,372	0,749	0,879	0,337	3,702	1,561
75	1,118	1,447	0,895	0,829	0,301	3,782	1,747
80	0,926	1,557	1,080	0,765	0,261	3,912	2,034
83	0,816	1,653	1,226	0,717	0,235	4,039	2,308
85	0,740	1,743	1,352	0,675	0,215	4,165	2,580
86	0,699	1,801	1,430	0,651	0,204	4,250	2,768
87	0,655	1,874	1,526	0,621	0,191	4,362	3,017

Поскольку вычисленные геометрические параметры приходятся на 1 м² площади, их можно назвать удельными характеристиками поперечного сечения емкости. Используя результаты вычислений, получили ряд аппроксимирующих зависимостей для этих удельных характеристик. Известно, что зависимость площади плоской фигуры от ее линейных геометрических характеристик квадратичная. Соответственно, для вычисления абсолютных значений линейных характеристик сечения емкости необходимо в перечисленные зависимости добавить множитель $\sqrt{\Omega}$. В результате получили нижеприведенные формулы:

ширина наполняемой емкости

$$B_o = (-0,0477C^2 + 0,563C + 0,609)\sqrt{\Omega}, \quad (9)$$

достоверность аппроксимации $R^2 = 1$ [16];

ширина основания емкости

$$B = (-0,236C^2 + 1,615C + 1,221)\sqrt{\Omega}, \quad (10)$$

$R^2 = 0,997$;

высота емкости

$$H_o = (0,0846C^2 + 0,564C + 1,561)\sqrt{\Omega}, \quad (11)$$

$R^2 = 0,997$;

высота крайней боковой точки поперечного сечения емкости

$$H_b = (0,0892C^2 - 0,509C + 0,924)\sqrt{\Omega}, \quad (12)$$

$R^2 = 0,990$;

периметр поперечного сечения гибкой оболочки

$$L = (0,439C + 3,029)\sqrt{\Omega}, \quad (13)$$

$R^2 = 0,998$;

высота расположения линии нулевого давления над основанием емкости

$$H = (1,988C^4 - 18,222C^3 + 61,668C^2 - 91,655C + 51,556)\sqrt{\Omega}, \quad (14)$$

$R^2 = 0,990$.

Достоверность аппроксимации формул (9)–(14) не менее 0,99, т. е. точность расчетов по ним практически не отличается от точности расчетов по приведенным аналитическим формулам. При этом выражения (9)–(14) лишены ранее указанных недостатков.

По величине B принимается ширина пластин основания, по периметру поперечного сечения емкости – необходимая ширина полосы материала, из которого предполагается изготовление оболочки. Также эти величины нужны при определении размеров кожуха. Ширина емкости, ширина ее основания, ее высота, а также высота расположения крайней боковой точки поперечного сечения требуются при проектировании передней и задней пластин. Высота расположения линии нулевого давления – при вычислении усилия натяжения гибкой оболочки и определении усилий, действующих на переднюю и заднюю пластины емкости, а также при подборе насоса.

При обосновании сил натяжения в гибкой оболочке воспользуемся расчетной схемой, приведенной на рис. 3. Сила натяжения в гибких связях направлена по касательной в рассматриваемой точке. Силы трения между поверхностью и жидкостью возникают только при движении их относительно друг друга [3, 18]. В данном случае такое движение отсутствует, соответственно, отсутствует и трение между жидкостью и гибкой оболочкой. Поэтому сила натяжения в гибкой оболочке будет одинакова во всех точках ее поперечного сечения в отличие, например, от случая заполнения оболочки сыпучей средой [14, 19].

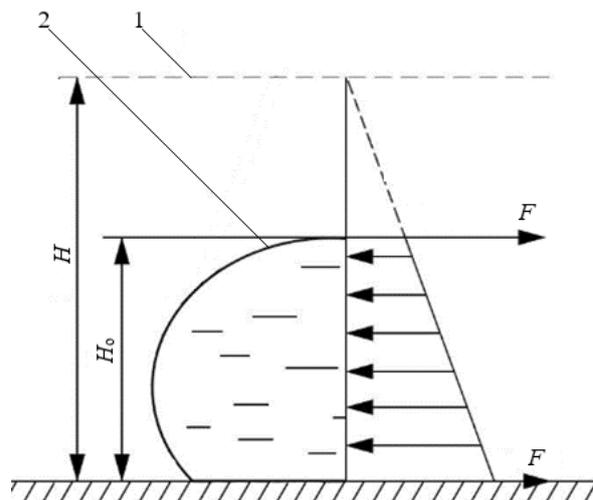


Рис. 3. Схема определения усилий в гибкой оболочке: 1 – линия нулевого давления; 2 – гибкая оболочка
Fig. 3. The scheme for determining the forces in a flexible shell: 1 – zero pressure line; 2 – flexible shell

Рассмотрим наиболее высокое вертикальное сечение емкости в виде продольной плоскости, проходящей по оси ее симметрии. При этом будем оперировать удельными усилиями, т. е. усилиями, действующими на 1 пог. м длины

емкости. На рис. 3 изображена эпюра горизонтального гидростатического давления в указанном сечении. Согласно схеме и изложенным выше положениям горизонтальная составляющая равнодействующей гидростатического давления на гибкую оболочку уравнивается 2 горизонтальными одинаковыми усилиями натяжения оболочки в ее верхней и нижней частях. С учетом этого получили формулу для определения удельного натяжения гибкой оболочки (Н/м)

$$F = 0,5(H - 0,5H_0)H_0\rho g, \quad (15)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

По полученной величине и допустимым значениям удельного разрывного усилия подбирают материал оболочки. При этом имеется в виду, что кожух предназначен только для защиты от внешних повреждений, хотя при соответствующем прижиме с помощью натяжных устройств он может воспринимать часть нагрузки. При использовании ПВХ – UNISOL [13] следует ориентироваться на удельное разрывное усилие в диапазоне 40–70 кН/м. Масса этого материала находится, соответственно, в диапазоне 0,63–0,90 кг/м².

Длину гибкой оболочки необходимо предусмотреть превышающей длину опоры. Торцевые поверхности оболочки в рабочем положении примыкают к торцевым пластинам, являются плоскими. При этом силы гидростатического давления на торцевые поверхности емкости будут восприниматься передней и задней пластинами. Определение силы гидростатического давления на плоские вертикальные поверхности при имеющихся данных – распространенная в инженерной практике задача [3, 18], как и последующие прочностные расчеты, связанные с передней и задней пластинами. Поэтому такие вопросы мы здесь не рассматриваем.

Предполагается следующий алгоритм определения параметров изучаемой наполняемой емкости. В зависимости от требуемой держашей силы опоры устанавливается необходимая вертикальная нагрузка, создаваемая наполняемой емкостью и передаваемая через пластины основания на грунтозацепы [11]. По вертикальной нагрузке определяется объем воды (м³), который должна вмещать наполняемая емкость:

$$V = \frac{P}{\rho g},$$

где P – требуемая вертикальная нагрузка, Н.

Делением полученного объема на длину емкости вычисляют площадь поперечного сечения емкости Ω в заполненном до проектного положения состоянии. Длину емкости принимают конструктивно в наиболее реалистичном диапазоне 3–5 м. Далее, задавая различные значения коэффициента формы C поперечного сечения емкости, определяют основные геометрические параметры сечения по формулам (9)–(13). Используя зависимость (14), вычисляют высоту расположения линии нулевого давления над основанием емкости. С помощью выражения (15) определяют удельное натяжение гибкой оболочки. Расчет рекомендуется выполнять с применением электронных таблиц. Это не только упрощает расчеты, но и позволяет наглядно представить результаты по многим вариантам и выбрать наиболее приемлемый с учетом различных факторов. Поиск наилучшего варианта предполагает наряду с варьированием коэффициента C варьирование и длины емкости. Указанный поиск можно вести более эффективно, имея представление о характере и степени влияния в

первую очередь коэффициента C на рассматриваемые характеристики наполняемой емкости. Это представление дают графики, построенные для единичной площади поперечного сечения емкости (рис. 4, 5). Следует иметь в виду, что с изменением этой площади относительные показатели характера и степени обобщенного влияния не меняются.

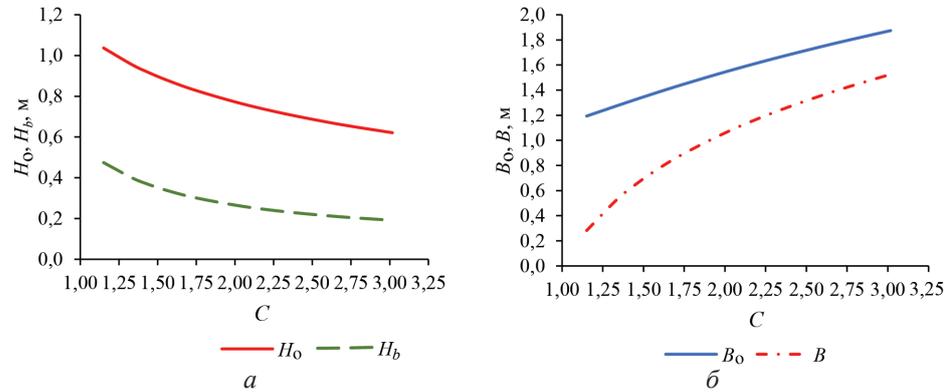


Рис. 4. Зависимости линейных характеристик поперечного сечения емкости от коэффициента формы C при площади $\Omega = 1 \text{ м}^2$: a – для вертикальных размеров; b – для горизонтальных размеров

Fig. 4. The dependencies of the linear characteristics of the cross-section of the container on the shape factor C for the area of $\Omega = 1 \text{ м}^2$: a – for vertical dimensions; b – for horizontal dimensions

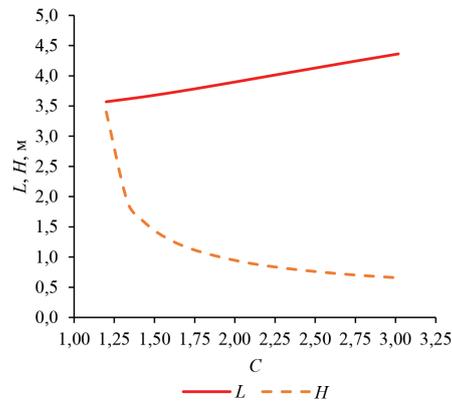


Рис. 5. Зависимости периметра поперечного сечения емкости L и высоты расположения линии нулевого давления H от коэффициента формы C при площади $\Omega = 1 \text{ м}^2$

Fig. 5. The dependencies of the perimeter of the cross-section of the container L and the height of the zero pressure line H on the shape factor C for the area of $\Omega = 1 \text{ м}^2$

Анализируя указанные графики, установили, что принимать коэффициент формы меньше 1,5 нецелесообразно, поскольку ширина основания при единичной площади и указанном значении C будет около 0,7 м, ширина емкости – 1,4 м, ее высота – 0,9 м (рис. 4). Поперечная устойчивость емкости при таких размерах поперечного сечения может быть недостаточной. При уменьшении коэффициента формы соотношение указанных размеров становится в этом плане еще менее благоприятным. Кроме того, с уменьшением C от указанного значения наблюдается более интенсивное увеличение высоты H (рис. 5), а значит, и давления жидкости в емкости и, соответственно, натяжения оболочки и гидростатической нагрузки на торцевые пластины емкости.

С ростом коэффициента формы увеличивается ширина основания емкости, а следовательно, и необходимая ширина соответствующих пластин, повы-

шается также периметр оболочки, т. е. расход материала на нее, но уменьшается величина H и, соответственно, давление в емкости, натяжение в оболочке и сила давления на торцевые пластины. Согласно рис. 5, интенсивность уменьшения H при коэффициенте C больше 2,0 значительно снижается. С учетом изложенного рекомендуемый диапазон указанного коэффициента на начальном этапе проектирования – от 1,5 до 2,0.

Изменение коэффициента C от 1,5 до 2,0 приводит к увеличению ширины пластин основания примерно на 50 %, а периметра сечения оболочки – на 8 %, уменьшению величины H и, соответственно, давления в емкости на 47 %, сил натяжения в оболочке – почти в 2 раза с учетом снижения высоты емкости на 18 %.

Увеличение или уменьшение длины емкости в n раз при сохранении объема связано с уменьшением или увеличением в такое же количество раз площади ее поперечного сечения. При этом линейные размеры сечения необходимо будет изменить в $n^{0,5}$ раз.

Варьируя коэффициент формы и длину емкости в рекомендованных диапазонах, используя приведенную информацию, принимают наиболее приемлемый в данном случае вариант с учетом иных факторов – к ним могут быть отнесены нормативные размеры и другие дискретные характеристики материалов, из которых предполагается изготавливать емкость и элементы опоры, условия предполагаемых мест ее эксплуатации и т. д.

Не исключается в итоге выход за пределы рекомендованных диапазонов факторов. Например, при проектировании особо крупных опор допустимо принятие коэффициентов формы больше 2,0 с целью уменьшения натяжения гибкой оболочки или, наоборот, меньше 1,5 при проектировании малых опор. Во втором случае вопрос поперечной устойчивости может быть решен путем небольшой доработки конструкции. Для этого достаточно к листу основания снизу прикрепить поперечную балку, концы которой соединить гибкими растяжками с верхней частью емкости.

Анализ показал, что при реалистичных параметрах наполняемой емкости и размещении ее непосредственно у водоема для закачки воды могут быть использованы низконапорные насосы. Тем не менее при выборе насоса полученная в результате расчетов величина H будет полезной. В тех случаях, когда опору потребуется разместить на высоком коренном берегу, не исключена потребность в средненапорном насосе.

Взяв за базовый вариант подобную опору с наполняемыми емкостями из еврокубов, имеющую размеры несущего основания 3×1 м [11], установили, что площадь поперечного сечения опоры, рассматриваемой в этой статье, при аналогичных размерах несущего основания и коэффициенте формы наполняемой емкости 1,5 будет в 2,3 раза больше, во столько же раз будут выше масса закачиваемой воды, сила тяжести, передаваемая на гибкое основание и, соответственно, держащая сила опоры. Если количество еврокубов у базового варианта увеличить с 3 до 6, примерно выравняв держащую силу сопоставляемых опор, и определить суммарные площади поверхностей емкостей, то выяснится, что в варианте с еврокубами она больше в 1,8 раза. При этом суммарная толщина гибкой оболочки и кожура существенно меньше толщины стенки еврокуба.

Предполагаемые габаритные размеры рассматриваемых опор: длина – 3–5 м; высота – 0,9–1,8 м; ширина – 1,4–3,6 м; удерживающая сила – 30–200 кН.

Выводы

1. Разработали конструкцию новой модификации мобильной береговой опоры с наполняемой емкостью, имеющей гибкую оболочку. Преимуществами данной конструкции являются сниженный расход материала на изготовление емкости, уменьшение габаритов опоры в транспортном положении, возможность изготовления опоры любого реалистичного размера без привязки к фиксированным размерам еврокубов.

2. Теоретическим путем получили аналитические формулы для определения основных характеристик поперечного сечения наполняемой емкости с гибкой оболочкой. Зависимости оказались полезными при научных исследованиях, однако очень неудобными при практических расчетах.

3. Выполнив необходимые вычисления по указанным аналитическим формулам, получили результаты, используя которые подобрали соответствующие аппроксимирующие зависимости аналогичной точности, более удобные в инженерных расчетах.

4. Установили характер и степень влияния коэффициента формы поперечного сечения емкости при его заданной площади, а также длины емкости на другие геометрические, а следовательно, и прочностные характеристики. На основе полученной информации рекомендовали на начальном этапе проектирования коэффициент формы поперечного сечения принимать равным от 1,5 до 2,0. Рекомендуемая длина емкости – от 3 до 5 м.

5. Разработали алгоритм обоснования основных параметров наполняемой емкости с гибкой оболочкой с применением полученных результатов, включая предложенную формулу для определения удельного натяжения гибкой оболочки. Дали соответствующие пояснения и рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 1523508 СССР, МПК В65G 69/20 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4343248/31-11: заявл. 03.11.1987: опубл. 23.11.1989 / В.Г. Таскаев.

Taskaev V.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1523508, 1989. (In Russ.).

2. А. с. 1548321 СССР, МПК E02B 3/06 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 4360415/30-15: заявл. 06.01.1988: опубл. 07.03.1990 / В.Г. Таскаев, Г.Г. Чешков.

Taskaev V.G., Cheshkov G.G. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. USSR, no. SU 1548321, 1990. (In Russ.).

3. Войткунский Я.И., Фаддеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1982. 455 с.

Vojtkunskij Ya.I., Fadeev Yu.I., Fedyaevskij K.K. *Hydromechanics*: 2nd ed., revised and enlarged. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 455 p. (In Russ.).

4. Еврокуб // Сайт «Завода удачных теплиц». Режим доступа: <https://tepli4ki.ru/> (дата обращения: 17.01.22).

Eurocube. *The Website of "The Successful Greenhouse Plant"*. (In Russ.).

5. Козлов К.В., Беляев Н.С., Посыпанов С.В. Анализ крепления лесосплавных объектов при коротких сроках навигации // *Инновации. Наука. Образование*. 2021. № 36. С. 1543–1546.

Kozlov K.V., Belyaev N.S., Posypanov S.V. Analysis of Anchoring of Timber-Rafting Facilities for Short Navigation Periods. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2021, no. 36, pp. 1543–1546. (In Russ.).

6. Козлов К.В., Посыпанов С.В. Использование мобильных наполняемых опор для крепления наплавных объектов на лесосплаве // *Инновации. Наука. Образование*. 2020. № 23. С. 541–545.

Kozlov K.V., Posypanov S.V. The Use of Mobile Fillable Anchors for Holding the Floating Objects in Timber Rafting. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*, 2020, no. 23, pp. 541–545. (In Russ.).

7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. 4-е изд. М.: Наука, 1977. 831 с.

Korn G., Korn T. *Handbook of Mathematics for Researchers and Engineers*: 4th ed. Moscow, Nauka Publ., 1977. 831 p. (In Russ.).

8. Патент 119757 РФ, МПК E02B 1/00 (2006.01), E02B 3/00 (2006.01), E01D 19/00 (2006.01). Анкерная опора для берегового крепления наплавных сооружений: № 2012116665/13: заявл. 24.04.2012: опубл. 27.08.2012 / Г.Я. Суков, А.Н. Вихарев, С.Е. Лихачев, А.А. Емельянов.

Sukov G.Ya., Vikharev A.N., Likhachev S.E., Emel'yanov A.A. *The Anchor for Holding the Floating Structures to the Shore*. Patent RF no. RU 119757, 2012. (In Russ.).

9. Патент 2313632 РФ, МПК E02B 3/00 (2006.01), B65G 69/20 (2006.01), E02B 15/00 (2006.01). Устройство для берегового крепления наплавных сооружений: № 2006100940/11: заявл. 10.01.2006: опубл. 27.12.2007 / Г.Я. Суков, А.Н. Вихарев.

Sukov G.Ya., Vikharev A.N. *A Device for Shore Anchorage of Floating Structures*. Patent RF no. RU 2313632, 2007. (In Russ.).

10. Патыкин В.И., Дмитриев Ю.Я., Зайцев А.А. Водный транспорт леса. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 336 с.

Patyakin V.I., Dmitriev Yu.Ya., Zaytsev A.A. *Water Log Movement*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1985. 336 p. (In Russ.).

11. Посыпанов С.В., Козлов К.В. Теоретическое обоснование держащей силы мобильной опоры для крепления лесосплавных объектов // *Изв. вузов. Лесн. журн*. 2024. № 1. С. 141–151.

Posypanov S.V., Kozlov K.V. Theoretical Justification of the Holding Power of a Mobile Anchor for Holding Timber-Rafting Objects. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 1, pp. 141–151. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-141-151>

12. Таскаев В.Г. Береговые опоры лесосплава. Архангельск: АЛТИ, 1991. 84 с.

Taskaev V.G. *Shore Timber Rafting Anchors*. Arkhangelsk, Arkhangelsk Forestry Engineering Institute Publ., 1991. 84 p. (In Russ.).

13. Ткани Hanwha // Торговый дом «Технический Текстиль»: сайт. Режим доступа: https://ttex.ru/catalog/tkani_hanwha_koreya/ (дата обращения: 17.01.24).

Hanwha Fabrics. *The Website of the Trading House "Technical Textile"*. (In Russ.).

14. Цытович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.

Tsytovich N.A. *Mechanics of Soils*: 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).

15. Byrd P.F., Friedman M.D. *Handbook of Elliptic Integrals for Engineers and Scientists*: 2nd ed. Heidelberg, Berlin, New York, Springer-Verlag, 1971, vol. 67. 360 p.
16. Field A. *Discovering Statistics Using SPSS*: 3rd ed. London, SAGE Publications, 2009. 821 p.
17. Gradshteyn I.S., Ryzhik I.M. *Table of Integrals, Series and Products*: 6th ed. San Diego, Academic Press, 2000. 46 p.
18. Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, 2010. 620 p.
19. Verruijt A. *Soil Mechanics*. Delft University of Technology, 2012. 331 p.
20. Yam K.L. *The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology*. John Wiley & Sons, 2009. 1376 p. <https://doi.org/10.1002/9780470541395>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article