

Д. О. БАННИКОВ (ДИИТ)

СНИЖЕНИЕ ПЛОЩАДИ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ЕМКОСТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Сталеві ємнісні конструкції у теперішній час є одним з найбільш розповсюджених типів тонкостінних листових конструкцій. Одна з головних проблем їх експлуатації полягає у підвищеному рівні корозійного зносу. Як показує накопичений досвід, міри захисту, які використовуються, є недостатньо ефективними. Автором пропонується інший підхід, що полягає в оптимізації конструктивної форми ємнісних споруд за критерієм мінімуму маси. За оцінкою автора, це дозволяє зменшити площу бокової поверхні конструкцій на 30 % порівняно із існуючими традиційними конструктивними схемами.

Стальные емкостные конструкции в настоящее время являются одним из наиболее распространенных типов тонкостенных листовых конструкций. Одна из главных проблем их эксплуатации заключается в повышенном уровне коррозионного износа. Как показывает накопленный опыт, применяемые меры защиты недостаточно эффективны. Автором предлагается иной подход, заключающийся в оптимизации конструктивной формы емкостных сооружений по критерию минимума массы. По оценке автора, это позволяет уменьшить площадь боковой поверхности конструкций на 30 % по сравнению с существующими традиционными конструктивными схемами.

Steel reservoir-type constructions are now some of the most widespread types of thin-walled structures. One of the biggest problems with them now is the increased level of corrosion wear during the operation. All the used methods, as practice shows, are not fully efficient. The author suggests another way: it is optimization of the structural shape on the basis of minimization of wall mass criteria. According to the author's data, it allows reducing the side surface area of the reservoirs by 30% in comparison with conventional designs.

1. Виды стальных емкостных конструкций

Стальные емкостные конструкции являются одним из наиболее распространенных видов листовых конструкций. Они предназначены для хранения, аккумуляции и, в некоторых случаях, предварительной переработке разнообразных веществ – сыпучих материалов, жидкостей, газов – на транспорте, а также во многих отраслях промышленности и сельского хозяйства. К ним относятся такие сооружения, как бункера, силосы, резервуары, газгольдеры, скрубберы, пылеуловители.

Конструктивно все сооружения такого типа являются вертикальными сосудами, состоящими из нескольких взаимосвязанных частей. Форма каждой части определяется особенностями того технологического процесса, в котором используется конструкция. Чаще всего она представляет собой правильные вертикальные призмы, цилиндры либо конусы, имеющие вертикальную ось симметрии.

На рис. 1 приведены наиболее распространенные виды и формы стальных емкостных конструкций, широко применяемых в настоящее время.

Как следует из приведенных иллюстраций, форма и геометрические размеры таких конструкций достаточно разнообразны. Между тем,

выбор формы емкостной конструкции в плане, а также назначение основных размеров каждой из частей конструкции традиционно выполняется с учетом целого ряда специальных рекомендаций. Их суть сводится к приданию емкости такой формы, которая с одной стороны обеспечила бы требуемый объем сооружения, а с другой стороны – равномерную и бесперебойную выгрузку из нее хранимого вещества.

Заметим, что для жидкостей и газов второй аспект является менее определяющим, для сыпучих материалов – именно он предопределяет внешнюю форму сооружения [1–3]. В основном эти рекомендации касаются воронки, а их точное выполнение, как показывает практика эксплуатации, действительно позволяет обеспечить требуемое качество разгрузки сооружения. В дальнейшем размеры вертикальных частей назначают исходя из требуемого объема конструкции, определяемого соответствующим технологическим процессом.

Одной из главных проблем сооружений такого класса в настоящее время является их повышенный коррозионный износ, обусловленный, во многих случаях, достаточно агрессивной внешней средой в условиях действующего производства и повышенной химической активностью самого вещества, находящегося внутри емкости.

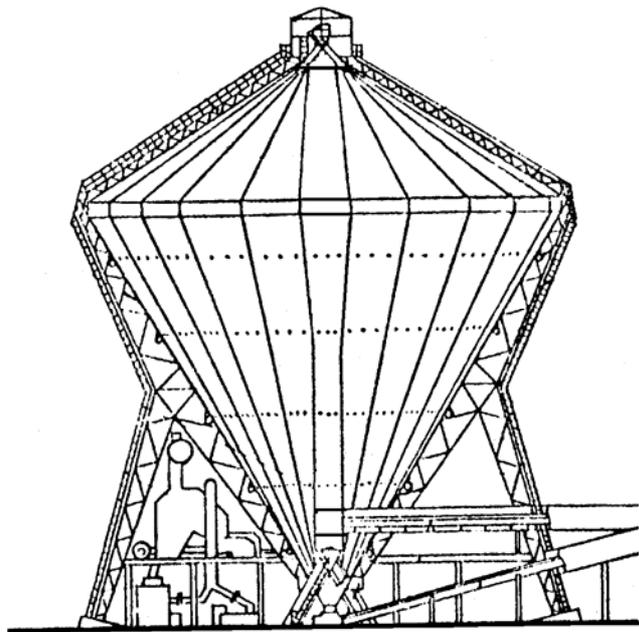
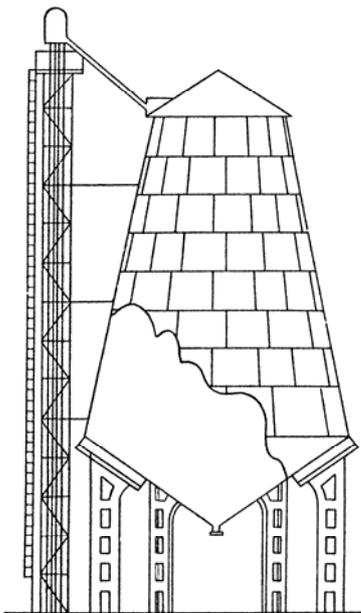
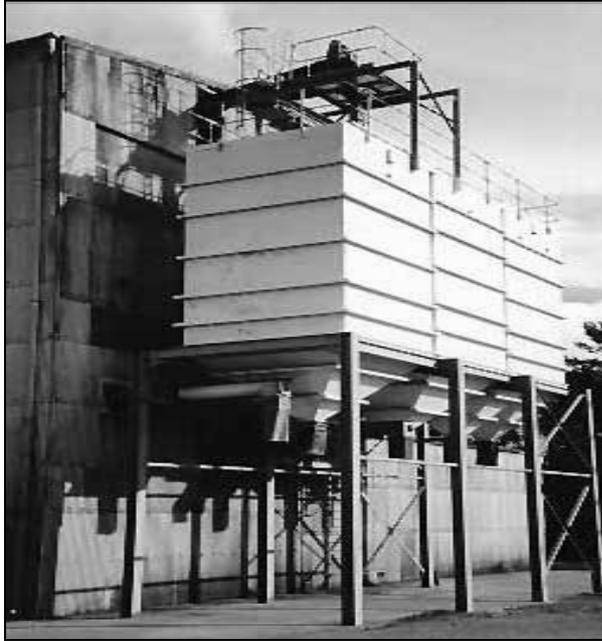


Рис. 1. Применяемые стальные емкостные конструкции

Как показывает накопленный опыт эксплуатации такого типа конструкций, применяемые меры защиты от коррозии (окраска, периодический ремонт и пр.) не обеспечивают полной защиты сооружений даже при их регулярном проведении [4]. Кроме этого, выполнение такого рода мероприятий связано с повышенными материальными затратами.

В связи с этим автором предлагается альтернативный подход к решению данной проблемы. Его суть заключается в оптимизации конструктивной формы емкости по критерию минимизации массы оболочечной части сооружения. Поскольку рассматриваемые конструкции представляют собой емкости, в которых 50...100 % материала сосредоточено именно в этой части, то выбор ее рациональной формы еще на стадии проектирования позволяет снизить площадь поверхности, подверженную воздействию внешней агрессивной среды.

2. Существующие подходы к снижению площади боковой поверхности стальных емкостей

Несмотря на очевидную важность и практическую ценность решения проблемы рационального выбора формы емкостной конструкции, ее решению на протяжении всей истории формирования и развития теории стальных емкостных конструкций уделялось исключительно мало внимания.

Впервые, в общем виде данная идея применительно к возможности снижения площади конструкции, подверженной коррозионному износу, была сформулирована в работе [5]. Здесь же было указано, что данный подход является «...основным способом снижения потерь металла от коррозии...» [5, с. 306]. Однако конкретных количественных результатов и выражений, позволяющих проектировать оптимальные конструкции, приведено не было.

Одним из первых количественных решений, изложенным безотносительно к возможности его использования для снижения коррозионного износа, является решение, предложенное еще в начале XX века известными своими работами в области бункеростроения исследователем В. Г. Алферовым. В своей монографии [6] он рассмотрел простейший случай квадратного в плане пирамидально-призматического бункера и пришел к выводу о том, что минимальную боковую поверхность будет иметь емкость в виде пирамиды, т. е. без вертикальной части.

Как показывают результаты анализа, выполненные автором настоящей публикации,

такой вывод не соответствует действительности, хотя он был сделан на основе абсолютно верных математических выкладок, не доведенных, однако, до логического завершения. Тем не менее, данная идея господствовала в теории проектирования емкостных конструкций примерно до конца XX века и неоднократно дублировалась в ряде работ [7].

Отметим, что в течение этого промежутка времени сама затронутая тематика рационализации геометрической формы сооружений данного класса математически не разрабатывалась, что связано, по нашему мнению, не только сложностью математической постановки и описания задачи в общем виде, но и отсутствием серьезных полномасштабных исследований работы емкостных конструкций как таковых.

В конце XX – начале XXI века рассматриваемый вопрос начал освещаться в работах известного в России исследователя по теории бункерных конструкций Х. Ягофарова и его сына А. Х. Ягофарова [8; 9]. Ими были получены выражения, позволяющие указать оптимальные соотношения геометрических размеров отдельных частей упрощенных квадратного пирамидально-призматического и круглого бункеров соответственно. В качестве критерия оптимизации выбран критерий минимума расхода конструкционного материала. Полученные результаты подтвердили ошибочность вывода В. Г. Алферова и позволяют с достаточной для практических целей точностью выполнять оценку оптимального решения для рассмотренного случая.

Таким образом, все имеющиеся на сегодняшний день исследования позволяют рассмотреть лишь некоторые частные задачи оптимизации геометрической формы стальных емкостных конструкций. Для более сложных случаев сооружений, состоящих, например, из трех и более вертикальных частей или имеющих непрямолинейное очертание стенок, решения не получены.

В связи с этим, целью настоящей публикации является описание математической модели, позволяющей оптимизировать форму и размеры стальных емкостных конструкций.

3. Формулировка математической задачи

Математическая модель, разработанная и предлагаемая автором настоящей публикации, получена на основе несложных геометрических построений.

Рассмотрим емкость, состоящую из произвольного количества k отдельных частей, свя-

занных конструктивно (рис. 2). Каждая часть представляет собой пространственную объемную фигуру, имеющую горизонтальное поперечное сечение в любом месте в виде правильного многоугольника с количеством сторон n или, в предельном случае, круга. Боковые поверхности образованы кривыми, описываемыми функцией $R(y)$, которые в частном случае могут быть прямолинейными. Вся конструкция предполагается двояксимметричной относительно вертикальной оси Y .

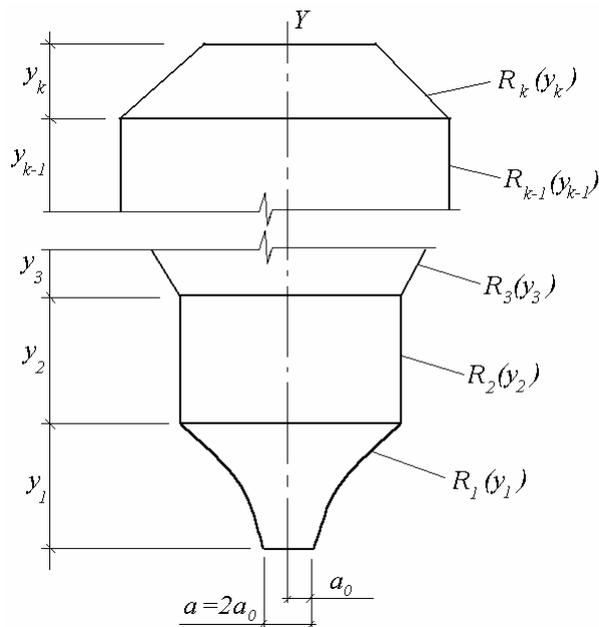


Рис. 2. Произвольная емкость

В качестве заданных параметров предполагаются следующие величины: ширина выпускного отверстия a в нижней части емкости, определяемая технологическими параметрами емкости, такими как производительность, отсутствие сводообразования и пр. [2]; форма боковой стенки произвольной i -й части емкости $R_i(y_i)$, также определяемая технологическими параметрами; толщина i -й части емкости t_i , назначаемая в первом приближении на основе накопленного опыта проектирования (заметим, что для емкостей с оребрением боковой поверхности в качестве толщины стенки может быть принята условная величина, с учетом материала ребер жесткости). Заданными по технологическим и конструктивным соображениям предполагаются количество отдельных частей емкости k и количество сторон многоугольника в горизонтальном поперечном сечении n_i . При этом предполагается, что в каждой части может быть принята своя форма поперечного сечения, не обязательно единообразная для

всей емкости. Например, воронка может быть выполнена в виде фигуры с сечением в форме круга, а следующая часть емкости – иметь поперечное сечение в форме квадрата. Вопросы конструктивной стыковки таких частей в данной публикации не рассматриваются.

Еще одним заданным по технологическим соображениям параметром является объем емкости V , который и определяет возможность постановки математической задачи. Величина объема на практике может определяться конструктивными параметрами, связанными, например, с условиями размещения емкости на территории, где предположительно проходит технологический процесс.

Условимся также, что в дальнейших выкладках нумерация отдельных частей емкости будет выполняться последовательно снизу вверх, начиная с нижней выпускной части (см. рис. 2).

В ходе решения задачи требуется определить оптимальные высоты отдельных частей емкости y_i при условии получения минимальной массы сооружения.

Для количественного описания сути сформулированной задачи рассмотрим пространственную фигуру, изображенную на рис. 3.

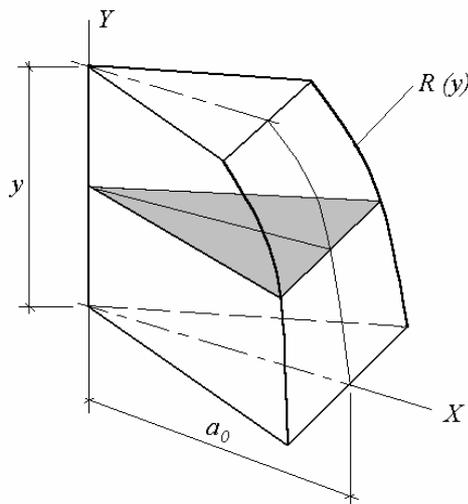


Рис. 3. Произвольный сегмент емкости

Она представляет собой произвольный сегмент емкости, образованный двумя горизонтальными плоскостями, ограничивающими фигуру сверху и снизу, двумя вертикальными плоскостями, выделяющими сегмент из всей части емкости, а также боковой поверхностью, описываемой уравнением $R(y)$. Произвольное горизонтальное сечение фигуры (на рис. 3 показано более темным цветом) является сектором n -угольника для поперечного сечения соответствующей части емкости (рис. 4).

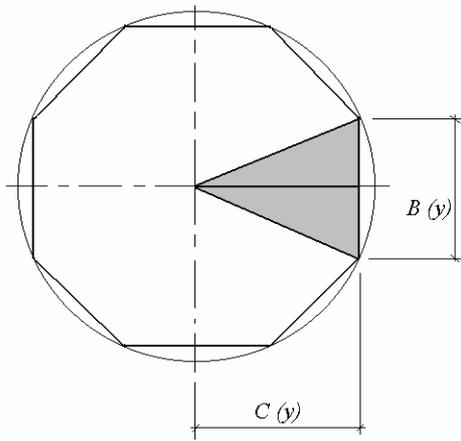


Рис. 4. Поперечное сечение i -й части емкости

Величина радиуса вписанной окружности, необходимая для дальнейших преобразований, определится по условию

$$C(y) = a_0 + R(y).$$

Площадь поперечного сечения фигуры (см. рис. 3) в приведенных обозначениях будет равна

$$A(y) = C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n).$$

Тогда ее объем определится выражением (1):

$$V_1 = \int_0^y A(y) dy = \int_0^y C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n) dy. \quad (1)$$

Соответственно для фигуры составленной из n аналогичных сегментов объем определится выражением (2):

$$\begin{aligned} V = nV_1 &= n \int_0^y C^2(y) \operatorname{tg}(\pi/n) dy = \\ &= n \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C^2(y) dy. \quad (2) \end{aligned}$$

Рассуждая аналогично, выражение для площади боковой поверхности сегмента (см. рис. 3) определится выражением (3), а для фигуры составленной из n аналогичных сегментов – выражением (4):

$$\begin{aligned} S_1 &= \int_0^y B(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy = \\ &= \int_0^y 2C(y) \operatorname{tg}(\pi/n) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy, \quad (3) \end{aligned}$$

$$S = nS_1 = 2n \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy. \quad (4)$$

Масса всего сегмента будет равна площади боковой поверхности, по выражению (4), умноженной на толщину стенки сегмента t и определится выражением (5):

$$V_m = St = 2nt \operatorname{tg}(\pi/n) \int_0^y C(y) \sqrt{1 + \left[\frac{dC(y)}{dy} \right]^2} dy. \quad (5)$$

Для емкостей, состоящих из произвольного количества k отдельных частей, выражение для нахождения массы конструкции примет вид (6)

$$\begin{aligned} V_m = St &= 2 \sum_{i=1}^k t_i n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \times \\ &\times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \sqrt{1 + \left[\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} dy_i. \quad (6) \end{aligned}$$

Полученное выражение (6) и является той функцией, которая должна быть минимизирована для решения сформулированной ранее задачи об отыскании оптимальных высот всех частей емкостного сооружения.

Ограничениями при этом являются выражения, отражающие взаимосвязь отдельных частей конструкции между собой. При условии связанности частей данное условие математически запишется в виде (7), при отсутствии такой связанности – в виде (8):

$$C_i(y_i) = a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j), \quad (7)$$

$$C_i(y_i) = a_{0i} + R_i(y_i). \quad (8)$$

Заметим, что в последнем случае исходная задача трансформируется в задачу отыскания оптимальных высот отдельных геометрических пространственных фигур, например, конусов или цилиндров, между собой не соединенных.

4. Решение поставленной задачи

Сформулированная в предыдущем разделе публикации математическая задача представляет собой задачу на отыскание условного экстремума при заданных ограничениях. При этом исследуемая функция является функцией нескольких переменных, вид которой к тому же заранее неизвестен, т. е. она может быть как линейной, так и являться полиномом высших степеней или же содержать трансцендентные функции и пр. В каждом конкретном случае емкости вид функции, конечно, будет известен и определится заданной формой боковой поверхности – функцией $R(y)$.

Как правило, при решении подобных задач поступают примерно следующим образом. Все ограничения вносят в исследуемую функцию и далее находят для нее условные экстремумы, пользуясь известными из курса дифференциального исчисления необходимым условием наличия экстремума [10; 11]. После этого найденные точки исследуют на характер экстремума, для чего используют уже достаточное условие. Основной трудностью при этом является внесение ограничений в исходную функцию, доставляющий массу проблем и ограничивающий возможности исследований.

Для обхождения данной проблемы воспользуемся достаточно известным методом неопределенных множителей Лагранжа [10], который является одним из частных приложений теории неявных функций. Суть метода заключается в необходимости сформировать вспомогательную функцию L в виде выражения (9)

$$L = F + \sum_{i=1}^n \lambda_i O_i, \quad (9)$$

где F – исследуемая функция; λ_i – вспомогательный параметр; O_i – ограничение, записанное в виде уравнения, правая часть которого равна 0.

Поскольку в общем виде ограничений может быть несколько, то в правой части выражения (9) они суммируются.

Для рассматриваемого нами случая выражение (9) может быть записано в виде выражения (10), в котором исследуемая функция F опишется выражением (6), а ограничение будет иметь вид уравнения (2), записанного для конструкции емкости, состоящей из произвольного количества k частей:

$$F_m = \sum_{i=1}^k S_i t_i = 2 \sum_{i=1}^k t_i n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \times \\ \times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \sqrt{1 + \left[\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} dy_i + \\ + \lambda \left[\sum_{i=1}^k n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \int_0^{y_i} C_i^2(y_i) dy_i - V \right]. \quad (10)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_i} = 2n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) t_i \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right] \times \sqrt{1 + \left[\frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \right]^2} + 2 \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) t_m \times \\ \times \int_0^{y_m} \sqrt{1 + \left[\frac{dR_m(y_m)}{dy_m} \right]^2} dy_m + \lambda n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right]^2 + \lambda \frac{dR_i^2(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) y_m + \\ + \lambda 2 \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \sum_{m=i+1}^k n_m \operatorname{tg}(\pi/n_m) \int_0^{y_m} \left[a_0 + \sum_{l=1, l \neq i}^k R_l(y_l) \right] dy_m = 0. \quad (12)$$

Следуя далее методу неопределенных множителей Лагранжа, для вновь сформированной функции (10) отыскиваем ее экстремумы. Как известно из теории математического анализа, экстремумами функции могут являться либо стационарные точки, обращающие ее первые частные производные в нуль, либо точки разрыва. Это формулировка необходимого условия.

Для функции (10) точками разрыва являются только те точки, в которых функция $\operatorname{tg}(\pi/n)$ является разрывной, т. е. выполняется следующее условие (11):

$$\pi/n_i = \pi/2 + \pi N, \quad \text{при } N \in Z. \quad (11)$$

Математически данное выражение означает, что количество сторон в многоугольнике, являющемся поперечным сечением любой i -й части емкости, не должно равняться числам дробного ряда

$$2/3, 2/5, 2/7 \dots 2/(2N+1).$$

Физически такие многоугольники, естественно, не существуют, поэтому данные точки не могут нас интересовать с позиций решения поставленной задачи.

Попробуем отыскать стационарные точки. Для этого необходимо решить систему уравнений вида $\partial F_m / \partial y_i = 0$ совместно с уравнением связи $\partial F_m / \partial y = 0$.

Для получения общего вида первого уравнения используем выражение (7) для случая емкости, состоящей из полностью конструктивно связанных между собой частей, которое подставляем в выражение (10). Далее, взяв первую частную производную по произвольному i -му члену y_i и выполнив ряд преобразований, заключающихся в удалении нулевых членов в имеющихся суммах, а также анализе и упрощении вида интегралов и производных, получим общий вид решения в виде выражения (12):

Полученное выражение является достаточно громоздким и при практическом использовании требует значительной доли внимания, однако, его применение позволяет значительно сократить процесс отыскания оптимальных решений для самых разнообразных случаев, поскольку получаемые уравнения являются алгебраическими, а не дифференциальными.

Кроме этого, полученное решение является универсальным в плане возможности учета в нем самых разнообразных видов ограничивающих боковых поверхностей, которые возможно описать аналитически, а также количества и конструктивного решения отдельных частей емкости, из которых она составлена.

Уравнение связи фактически представляет собой исходное ограничение, записанное в виде выражения (13):

$$\sum_{i=1}^k n_i \operatorname{tg}(\pi/n_i) \int_0^{y_i} \left[a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right]^2 dy_i - V = 0. \quad (13)$$

Дальнейшее решение системы уравнений вида (12) совместно с уравнением связи (13) и позволяет получить искомое оптимальное решение. Для упрощения решения может быть рекомендована процедура, заимствованная из метода неопределенных множителей Лагранжа. Ее суть сводится к отысканию вначале параметра λ , а затем подстановки его в выражения для отыскания значений y_i . Такой подход, как показывает накопленный автором опыт, действительно позволяет сократить время решения.

Общего универсального решения в замкнутом виде сразу для выражений оптимальных высот y_i , по всей видимости, получено быть не может, поскольку оно определяется видом функции боковой поверхности $R_i(y_i)$, которое в свою очередь и определяет характер разрешения системы уравнений (12) и (13).

Отметим и еще одну особенность полученного решения: оно является лишь необходимым условием наличия экстремума. Доказательство его достаточности в общем виде является довольно сложным и в настоящей работе не приводится. Во многих случаях по смыслу полученного решения можно оценить, является ли оно искомым минимумом, что и выполняется на практике.

5. Практическое применение полученного решения для ряда частных случаев

Рассмотрим применение полученного решения для ряда частных случаев, имеющих наиболее важное практическое значение. Для них достаточно просто могут быть получены гото-

вые аналитические зависимости в замкнутом виде, позволяющие отыскать требуемые оптимальные размеры конструкции, и пригодные для непосредственного практического применения.

Одним из достаточно распространенных видов емкостей для хранения сыпучих материалов являются пирамидально-призматические бункера. Они представляют собой емкость, составленную из двух частей – верхней призматической и нижней – в форме усеченной пирамиды (рис. 1 и 5).

На практике, для возможности восприятия давления сыпучего материала, стенки стальной емкости подкрепляются горизонтальными либо вертикальными ребрами жесткости. Их учет в рассматриваемой математической модели выполняется за счет задания приведенной (увеличенной) толщины стенок. Так, по данным исследователей [8] масса ребер получается примерно равной массе стенок конструкции независимо от ее размеров и габаритов.

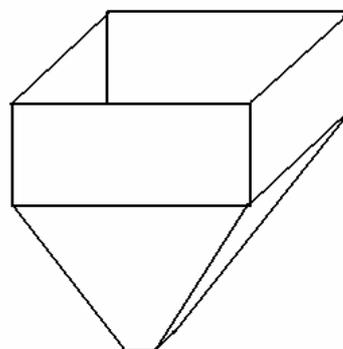


Рис. 5. Геометрическая схема пирамидально-призматического бункера

Для данного частного случая исходные параметры, подставляемые в общее решение, будут следующие: количество частей $k = 2$; количество сторон многоугольника в поперечном сечении $n_1 = n_2 = 4$; выражения, определяющие форму боковой поверхности нижней пирамидальной части и верхней призматической, будут описываться соотношениями (14) соответственно:

$$R_1(y_1) = y_1 / \operatorname{tg} \alpha, \quad R_2(y_2) = 0, \quad (14)$$

где α – угол наклона стенок нижней пирамидальной части к горизонту, а a_0 – половина ширины выпускного отверстия (см. рис. 2).

Величины угла α , размеров выпускного отверстия a_0 , толщин стенок емкости t_1 и t_2 , а также объема емкости V предполагаются заданными и фиксированными постоянными величинами.

Подставив все оговоренные величины в выражение (12) и выполнив промежуточные преобразования, получим два уравнения (15) и (16):

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_1} = \frac{8t_1}{\sin \alpha} \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{8t_2}{\operatorname{tg} \alpha} y_2 +$$

$$\lambda \left[4 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + \frac{8y_1 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{8a_0 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} \right] = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) t_2 + \lambda 4 \left(\alpha_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 = 0. \quad (16)$$

Уравнение связи (13) для данного случая с учетом оговоренных параметров может быть преобразовано к виду (17):

$$\frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = 4 \left(\alpha_0^2 y_1 + \frac{a_0 y_1^3}{\operatorname{tg} \alpha} + \lambda \frac{y_1^3}{3 \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) +$$

$$+ \left(4 \alpha_0^2 y_2 + \frac{2 a_0 y_1 y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right) - V = 0 \quad (17)$$

Далее, решив совместно уравнения (16) и (17), можно получить окончательное решение для отыскания оптимальной величины высоты нижней пирамидальной части в виде выражения (18). Все промежуточные вычисления в данной публикации опускаются.

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4a_0^3 \operatorname{tg}^3 \alpha t_2 \sin \alpha + 3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{4(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}} -$$

$$- a_0 \operatorname{tg} \alpha. \quad (18)$$

Соответственно величина оптимальной высоты верхней призматической части может быть найдена из выражения (17) и, опуская промежуточные математические вычисления, может быть представлена в виде выражения (19):

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \left[a_0^2 y_1 + a_0 y_1^2 / \operatorname{tg} \alpha + y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha) \right]}{4(a_0 - y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2} \quad (19)$$

Приведенные зависимости (18) и (19) также могут быть представлены более наглядно в графическом виде. Для этого зададимся конкретными числовыми значениями основных параметров рассматриваемой емкости. Пусть объем ее будет равен $V = 120 \text{ м}^3$, толщины стенок пирамидальной и призматической частей примем одинаковыми и равными $t_1 = t_2 = 6 \text{ мм}$, размер выпускного отверстия $a_0 = 0,3 \text{ м}$, угол наклона стенок пирамидальной части $\alpha = 60^\circ$.

График зависимости объема конструктивного материала емкости V_m от величин высот

нижней пирамидальной y_1 и верхней призматической y_2 частей представлен на рис. 6 и 7 соответственно.

Видно, что оба графика имеют явно выраженный минимум, который в количественном отношении (с использованием выражений (18) и (19)) равен: $y_1^{opt} = 5,17 \text{ м}$, $y_2^{opt} = 0,74 \text{ м}$.

Попутно заметим, что как уже было отмечено в разделе 2 настоящей публикации, вывод В. Г. Алферова о том, что оптимальной является пирамидально-призматическая емкость с нулевой верхней частью, не подтверждается математически (см. увеличенный фрагмент графика на рис. 7).

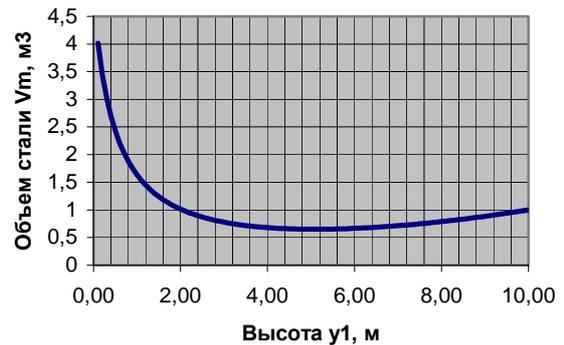


Рис. 6. График изменения высоты пирамидальной части емкости

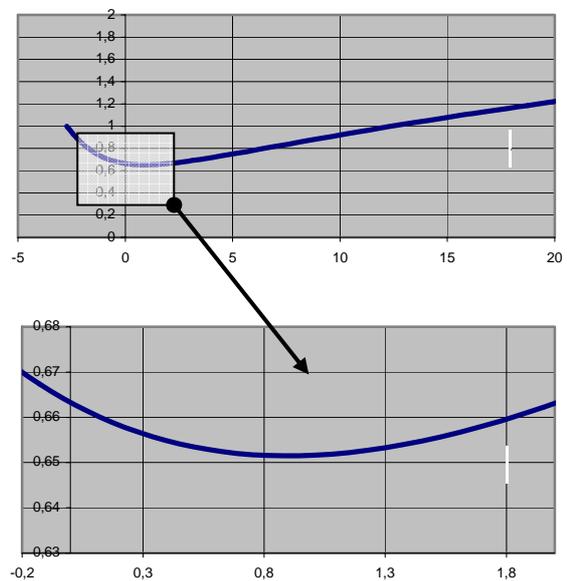


Рис. 7. График изменения высоты призматической части емкости

Для более простого частного случая пирамидально-призматической емкости, в которой условно принята ширина выпускного отверстия $a_0 = 0$, решения (18) и (19) упрощаются до вида соответственно (20) и (21):

$$y^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{4(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}}, \quad (20)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha)}{4(y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (21)$$

Именно такое решение было получено исследователем Х. Ягофаровым в работе [8].

Заметим также, что вычисленные значения оптимальных высот пирамидальной и призматической частей емкости по формулам (20) и (21) отличаются от результатов, подсчитанных по формулам (18) и (19), на незначительную величину: $y_1^{opt} = 5,69$ м (против 5,70 м в подкоренном выражении формулы (18)), $y_2^{opt} = 0,88$ м (против 0,74 м). Это согласуется с выводами работы [8], сделанными путем приближенной оценки.

На основе приведенных на рис. 6 и 7 графиков, возможно достаточно просто оценить экономичность реальных проектных решений. Так, например, если конструкция пирамидально-призматического бункера будет принята с развитой по высоте призматической частью (см. пример на рис. 1), равной, допустим, 10 м, тогда высота пирамидальной части при рассмотренных ранее остальных конструктивных параметрах будет равна 2,30 м. При этом объем стали увеличится с величины $0,65 \text{ м}^3$ (для оптимальных размеров емкости) до величины $0,92 \text{ м}^3$, что в процентном отношении составит приблизительно 40 %. Дальнейшее развитие вертикальной части бункера по высоте приведет к еще более неэкономичному решению.

Еще одним интересным случаем, имеющим немаловажное практическое значение, является случай конусно-цилиндрической емкости (см. рис. 1 и 8).

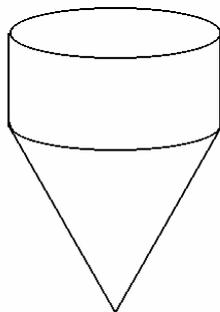


Рис. 8. Геометрическая схема упрощенного конусно-цилиндрического бункера

Для частного случая упрощенного бункера (при ширине выпускного отверстия $a_0 = 0$, выражения для оптимальных величин высот ко-

нусной и цилиндрической частей сооружения (выражения (22) и (23) соответственно) оказываются практически тождественны соответствующим выражениям для случая пирамидально-призматического бункера. Все различие между ними сводится к различию в одном коэффициенте, характеризующем количество сторон в поперечном сечении емкости.

$$y^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3t_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha V}{\pi(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)}}, \quad (22)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4y_1^3 / (3 \operatorname{tg}^2 \alpha)}{\pi(y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (23)$$

Из полученных решений можно заключить, что для емкостей с количеством сторон многоугольника в поперечном сечении емкости больше 4, аналогичные решения будут заключаться в пределах, установленных полученными решениями (20), (21) с верхней стороны и (22), (23) с нижней стороны.

Так, например, для принятых ранее конструктивных параметров емкости величины оптимальных высот, рассчитанные по формулам (22) и (23) составят: $y_1^{opt} = 6,17$ м, $y_2^{opt} = 1,17$ м.

Как видно, границы изменения высот невелики, поэтому при проведении практических вариантов прикидочно-оценочных расчетов как для многоугольных, так и для круглых в плане емкостей вполне возможным оказывается использовать только какие-либо однотипные выражения, например, (22), (23), как для стального конусно-цилиндрического бункера.

6. Заключительные замечания

Таким образом, представленный в настоящей публикации подход к снижению уровня коррозионного износа проектируемых стальных емкостных конструкций является несколько нетрадиционным, однако, при определенных условиях – достаточно эффективным.

Сравнение с традиционными существующими проектными решениями позволяет заключить, что в них имеются резервы снижения материалоемкости конструкции на величину до 30...40 %, а в отдельных случаях и больше, только за счет выбора оптимальной геометрической формы конструкции при ее проектировании. При этом площадь боковой поверхности может быть уменьшена практически на такую же величину. Это позволит значительно снизить потери от коррозионного износа в условиях действующего производства.

Сама же предложенная в работе математическая модель, являясь достаточно общей относительно геометрии и структуры стальных емкостных конструкций, может быть с успехом применена также для любых иных сооружений, имеющих сходную геометрическую форму, например, воздухонагревателей, пылеуловителей, скрубберов, декомпозеров, сгустителей и даже конструкций кожуха доменной печи. Замечательной особенностью предложенной модели является также и ее безотносительность к материалу сооружения, что открывает достаточно широкие перспективы по ее использованию в сфере создания железобетонных или деревянных аналогичных конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна. – Введ. 01.07.98. – Вид. офіц. – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с. – Укр. та рос. мовами.
2. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
3. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: В 3 т. / Под ред. В.В. Кузнецова. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 526 с.
4. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Д., 1997.
5. Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
6. Алферов К. В. Бункеры, затворы и питатели. – Л.: Изд-во машиностроительной лит-ры, 1946. – 178 с.
7. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величина и В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
8. Ягофаров Х. Стальной пирамидально-призматический бункер как пространственная система: Приложение к дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Уральская гос. акад. путей сообщ. – Екатеринбург: УрГАПС, 1998. – 315 с. (рукопись).
9. Ягофаров А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / Уральская гос. ун. путей сообщ. – Екатеринбург, 2005. – 23 с.
10. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления: В 3 т. – М.: Наука, 1969.
11. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн; Пер. с англ. И. Г. Абрамовича, А. М. Березмана, И. А. Вайнштейна и др.; Под общ. ред. И. Г. Абрамовича. – М.: Наука, 1970. – 720 с.

Поступила в редколлегию 07.06.2005.