

СНИЖЕНИЕ МЕТАЛЛОЕМКОСТИ СТАЛЬНЫХ ПИРАМИДАЛЬНО-ПРИЗМАТИЧЕСКИХ БУНКЕРОВ

Д. О. Банников (ДИИТ)

Используемая в настоящее время методика расчета и конструирования стальных пирамидально-призматических бункеров [1] основана на расчленении конструкции на отдельные простые элементы с последующим расчетом каждого из них по элементарным плоским расчетным схемам. В результате из-за неучета пространственной работы системы бункера получаются очень неэкономичными, имеющими 3–4-кратный запас прочности.

Типичная конструктивная схема бункера представлена на рис. 1. Приведен наиболее распространенный тип бункера данного класса – прямоугольный симметричный бункер. Он состоит из вертикальной верхней призматической части и нижней пирамидальной части (в дальнейшем – воронка), вершина которой «срезается» разгрузочным отверстием. Как правило, призматическая часть формируется стенками двутавровых балок, которые являются верхней жесткой обвязкой бункера и соединяются в углах с опорными колоннами. Воронка образована стальными листами относительно небольшой толщины (6...14 мм), подкрепляемыми для возможности восприятия давления загружаемого материала горизонтальными ребрами жесткости из тавров или уголков. Иногда развитая по высоте призматическая часть также конструируется по типу пирамидальной воронки – из стальных листов, подкрепленных горизонтальными ребрами жесткости.

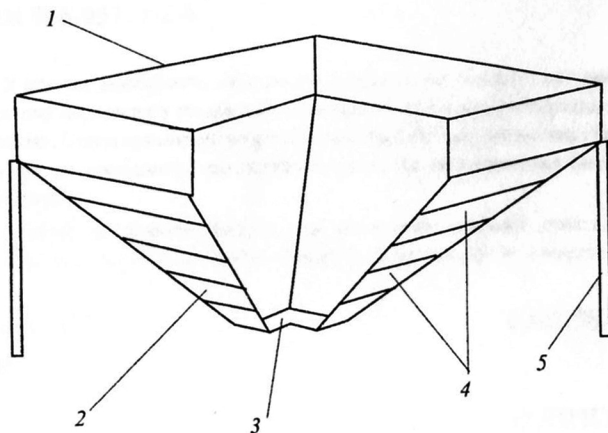


Рис. 1. Типичная конструктивная схема бункера:

1 – призматическая часть; 2 – пирамидальная часть; 3 – разгрузочное отверстие; 4 – горизонтальные ребра жесткости; 5 – опорные колонны

Именно эти ребра жесткости и требуют значительного расхода стали (до 50...60% массы всего бункера). Поэтому пути снижения металлоемкости таких бункеров без понижения их общей несущей способности и заключаются в снижении металлоемкости ребер жесткости, поскольку разумное понижение толщины стенки бункера на фоне довольно большого имеющего место в практике ее износа (до 50% толщины в отдельных местах, [2]) возможно только на 1...2 мм, что не дает существенного выигрыша, но может привести к авариям в условиях довольно жесткого режима эксплуатации и использования высокоабразивных материалов.

Современные исследователи в качестве одного из возможных путей решения данной проблемы предлагают применение новой расчетно-конструктивной схемы без ребер жесткости [3]. Безусловно, это довольно эффективный качественный шаг в улучшении самой конструкции бункеров, но необходимо проведение дальнейших исследований, связанных, например, с указанием оптимального или минимально допустимого количества ребер, возможностью применения данной конструктивной схемы в большиеразмерных бункерах и пр. Кроме того, в настоящее время часто возникает вопрос о ремонте существующих бункеров, поскольку срок их эксплуатации приближается к завершению, а строительство новых зачастую требует гораздо больших капиталовложений. Поэтому довольно актуальными остаются вопросы, связанные с анализом работы традиционной конструктивной схемы.

В данной публикации предлагаются некоторые результаты исследований работы горизонтальных ребер жесткости бункеров и возможные меры по снижению их металлоемкости.

В практике проектирования сечения горизонтальных ребер жесткости воронки бункера подбираются по наибольшему значению изгибающего момента, который находится методом попыток. В [4] сделана попытка сократить этот процесс, однако приведенные выкладки содержат ошибки. Ниже дан правильный вариант решения, расширенный и дополненный.

Рассмотрим квадратный в плане бункер (рис. 2). Согласно [1] изгибающий момент M_x в произвольном ребре длиной l_x вычисляется по формуле (1)

$$M_x = P_x l_x^2 / R, \quad (1)$$

где $R = 8, 12$ или 14 в зависимости от типа соединения ребер жесткости в углах бункера и учета пластичности; P_x — равномерно распределенная нагрузка на ребро с длиной l_x , определяемыми из выражений (2) и (3):

$$P_x = P_{nx} S / \sin \alpha; P_{nx} = \gamma_f m \cdot \gamma \cdot Y; m = \operatorname{tg}^2 (45 - \phi / 2) \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha; \quad (2)$$

$$l_x = l_0 - 2(Y - h_0) \operatorname{ctg} \alpha, \quad (3)$$

где P_{nx} – нормативное нормальное давление на наклонную стенку; S – шаг ребер (принят постоянным); α – угол наклона стенки воронки к горизонту; γ_f – коэффициент надежности по нагрузке; γ и ϕ – объемный вес и угол внутреннего трения загружаемого материала соответственно; m – коэффициент нормального давления; l_0 – длина бункера поверху; h_0 – высота призматической части (см. рис. 2).

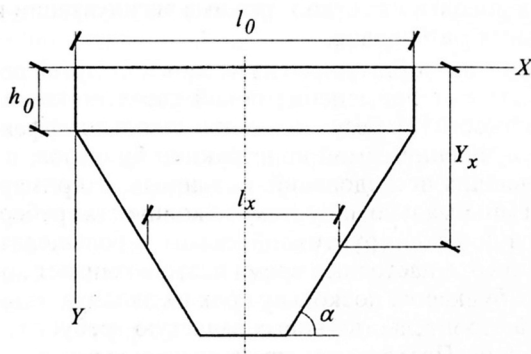


Рис. 2. Принятые обозначения и система координат

Подставив выражения (2) и (3) в (1), взяв первую производную по Y и приравняв ее нулю, получаем следующие точки экстремума для изгибающего момента по высоте бункера (4):

$$\begin{aligned} Y_1 &= h_0 + \operatorname{tg} \alpha \, l_0 / 2; \\ Y_2 &= (h_0 + \operatorname{tg} \alpha \, l_0 / 2) / 3 \end{aligned} \quad (4)$$

Для призматической части момент зависит от высоты Y линейно (m и l_x определяются по (5)) и, естественно, не имеет экстремумов:

$$\begin{aligned} m &= \operatorname{tg}^2 (45 - \phi / 2); \\ l_x &= l_0. \end{aligned} \quad (5)$$

Заметим также, что в случае прямоугольного бункера формулы немного усложнятся, но конечный результат будет одинаков в обоих случаях.

График, отражающий характер изменения величины изгибающего момента по высоте бункера, представлен на рис. 3, а. Видно, что Y_1 – точка минимума, где момент равен нулю. Геометрически – это вершина пирамидальной части. Максимальный же момент будет в точке Y_2 , расположенной на уровне 1/3 полной высоты мнимой пирамиды (от верха призматической части до геометрической вершины пирамиды). Скачок момента в месте перехода призмы в пирамиду реально не будет иметь место. В расположенном в данном месте ребре величина изгибающего момента будет промежуточной между значением для призматической и пирамидальной частей в данном месте.

Аналогичные выкладки могут быть сделаны и для определения максимума продольной силы в ребрах по высоте бункера. Согласно [1] продольная сила N_x в произвольном ребре длиной l_x вычисляется по формуле (6):

$$N_x = P_x l_x / 2. \quad (6)$$

Подставляя значения величин из (2) и (3) в (6), беря первую производную по Y и приравнявая ее нулю, получаем точку экстремума (7):

$$Y = (h_0 + \operatorname{tg} \alpha \cdot l_0/2)/3, \quad (7)$$

т. е. максимум продольной силы расположен на уровне половины высоты мнимой пирамиды. Характер распределения продольной силы по высоте бункера приведен на рис. 3,б.

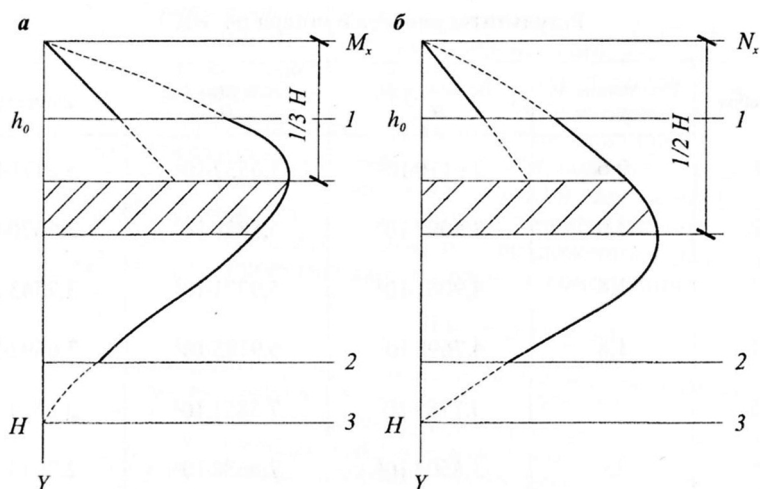


Рис. 3. Характер изменения изгибающего момента (а) и продольной силы (б) по высоте бункера

Таким образом мы получаем, что наиболее опасная зона с учетом действия изгибающего момента и продольной силы расположена между $1/3$ и $1/2$ высоты мнимой пирамиды (на рис. 3 заштриховано). С учетом того, что продольная сила вызывает появление нормальных напряжений в ребрах, которые составляют лишь $5 \dots 10\%$ напряжений от изгибающего момента, схема распределения нормальных напряжений будет очень близка к схеме распределения моментов по высоте бункера, а точка максимума напряжений – немного (в практике, на одно ребро) ниже точки максимума изгибающего момента.

Для проверки полученных аналитических зависимостей был выполнен численный анализ конструкции бункера на компьютере с применением МКЭ. Он полностью подтвердил справедливость полученных зависимостей. Результаты представлены в таблице. Расчет выполнен для квадратного бункера с высотой призматической части $0,6$ м, шагом горизонтальных ребер $0,4$ м и полной высотой $4,2$ м (при этом высота мнимой пирамиды

равна 4,6 м). Приведены максимальные значения изгибающего момента M_x , продольной силы N_x и нормальных напряжений (σ_x в ребрах жесткости). Напряжения получены несколько завышенные для реальных конструкций, но это связано лишь только с тем, что рассчитывался не реальный бункер, а некий условный, специально подобранный для возможности проверки перечисленных выше зависимостей.

Т а б л и ц а

Результаты расчета бункера по МКЭ

№ ребра	Расстояние до верха, м	Величина M_x , Н·м	Величина N_x , Н	Величина σ_x , МПа
1	0,6	$2,6170 \cdot 10^2$	$3,6537 \cdot 10^3$	$3,6471 \cdot 10^7$
2	1,0	$3,3097 \cdot 10^3$	$5,8859 \cdot 10^3$	$2,5670 \cdot 10^8$
3	1,4	$4,9061 \cdot 10^3$	$5,9771 \cdot 10^3$	$3,7543 \cdot 10^8$
4	1,8	$4,7698 \cdot 10^3$	$6,9185 \cdot 10^3$	$3,6692 \cdot 10^8$
5	2,2	$4,1785 \cdot 10^3$	$7,5851 \cdot 10^3$	$3,2594 \cdot 10^8$
6	2,6	$3,4504 \cdot 10^3$	$7,6680 \cdot 10^3$	$2,7045 \cdot 10^8$
7	3,0	$2,4849 \cdot 10^3$	$7,0869 \cdot 10^3$	$2,0340 \cdot 10^8$
8	3,4	$1,6430 \cdot 10^3$	$5,8933 \cdot 10^3$	$1,3375 \cdot 10^8$
9	3,8	$8,0370 \cdot 10^2$	$4,2196 \cdot 10^3$	$6,9194 \cdot 10^7$

При внимательном анализе полученных данных видно, что точки максимума всех приведенных факторов расположены немного ниже теоретических. Это связано с тем, что все полученные зависимости верны лишь при определенном соотношении жесткостей между призматической и пирамидальной частями бункера. Согласно обычной методике расчета по плоским расчетным схемам (как в [1]) это соотношение не учитывается. Численный же эксперимент указывает на необходимость его учета, поскольку изменение напряженно-деформированного состояния всего бункера при изменении такого соотношения иногда очень существенно.

Согласно полученным данным, влияние жесткости призматической части оказывается мало, если она на порядок меньше жесткости воронки. Практически это реализуется, если конструкция и размеры сечений призматической части приближены к соответствующим размерам воронки в ее

верхней части, а сама высота призматической части не превышает 1,5...2 шагов ребер жесткости. Иначе, жесткая призматическая часть препятствует свободной деформации верха воронки, и точки максимума момента и продольной силы смещаются вниз.

Таким образом, если выдерживаются указанные выше соотношения, то эпюра материала для ребер жесткости может быть максимально приближена к эпюре изгибающих моментов. По нашим подсчетам при этом возможно снижение массы ребер жесткости в 1,7...2 раза. Если же при этом ребра жесткости ориентировать не горизонтально, а перпендикулярно стенке воронки без их стыковки в углах бункеров (подробнее см. [5]), то теоретическая экономия металла за счет снижения размеров поперечных сечений ребер достигает трех раз, при этом не только не происходит потери несущей способности конструкции, но наоборот, повышается надежность ее работы, удастся избежать местных концентраций напряжений, так как распределение материала будет более соответствовать действительной работе бункера. Кроме этого, использование предложенных рекомендаций упрощает сам процесс проектирования и расчета конструкции.

Л и т е р а т у р а

1. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров. – М: – Стройиздат, 1983.
2. Wichtowski B., Nazarko W. Service Life of Steel Coke Bin – Non-destructive Testing (NDT) // Proceedings of 6th International Conference «Modern Building Materials, Structures and Techniques», Vilnius, Technika, 1999, Vol III, p. 155–159.
3. Ягофаров Х. О расчетной схеме стальной пирамидальной воронки бункера // Известия вузов: серия «Строительство и архитектура», 1985, №12.
4. Соловьев Н. Б., Панкин И. Е. Расчет элементов металлических прямоугольных бункеров // ЦИНИС. Строительное проектирование промышленных предприятий. Информационный выпуск. Серия 1, 1969, №4. С. 15–18.
5. Казакевич М. И., Кострица С. А., Банников Д. О. Эффективность расположения горизонтальных ребер жесткости бункеров // Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве. Строительство: Сб. научн. тр. ДИИТа. – Днепрпетровск: Арт-Пресс, 1998, вып. 5. С. 98–104.