

## РАСЧЕТ НАГРУЗОК НА СТЕНЫ БУНКЕРОВ ЦИЛИНДРОКОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Для расчетов конструкций накопительных, перепускных (демпферных) бункеров используются методики расчета простейших форм – вертикальный цилиндр или даже щелевая емкость с вертикальными параллельными стенками и никак не учитываются процессы движения материала при выпуске. Предлагается метод расчета для комбинированной формы бункера с учетом физико-механических свойств материала загрузки и стен бункера (угол естественного откоса, насыпной вес, коэффициенты трения между частицами материала и частиц о стены бункера при покое и движении материала) на базе использования модели дискретной среды в виде регулярной укладки шаров.

For calculations of designs accumulating, running (dampering) bunkers design procedures of the elementary forms the vertical cylinder or even slot-hole capacity with vertical parallel walls are used and processes of movement of a material are not considered in any way at release. The method of calculation for the combined form of the bunker in view of physicommechanical properties of a material of loading and walls of the bunker (a corner of a natural slope, bulk weight, factors of friction between particles of a material and particles about walls of the bunker is offered at rest and movement of a material) on the basis of use of model of the discrete environment in the form of regular stacking spheres.

При расчетах и проектировании демпферных бункеров для хранения шихтовых материалов на металлургических предприятиях серьезные трудности представляет определение нагрузок на стены и несущие элементы конструкции бункеров от загруженного в них материала. Применение методики Г.А.Янсена дает удовлетворительные результаты при расчете силосных башен – зернохранилищ, если они имеют только простейшую цилиндрическую форму. При комбинации цилиндрической и конической частей бункера традиционные методики расчетов по Янсену – Гячеву требуют назначения больших эмпирических коэффициентов запасов прочности, что неоправданно увеличивает материалоемкость конструкций.

Использование дискретной модели дробленых сыпучих материалов позволяет получить аналитически обоснованные расчетные нагрузки на элементы конструкции бункера.

При вертикальном цилиндрическом бункере (рис.1) можно воспользоваться известной методикой.

Распределенное нормальное давление на стену  $S_{\text{ц}}$ , кг/м<sup>2</sup>:

$$S = \frac{\gamma D}{4f_1} \left( 1 - u^{\frac{2h}{d} \operatorname{ctg} \beta} \right).$$

Среднее вертикальное давление

$$p = \frac{\gamma D \operatorname{tg} \beta}{2 |\ln u|} \left( 1 - u^{\frac{2h}{d} \operatorname{ctg} \beta} \right);$$

где  $D$  – диаметр бункера, м;  $\gamma$  – удельный насыпной вес материала, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – глубина сечения бункера от поверхности загрузки, где определяется давление, м;  $f_1$  – коэффициент трения покоя скольжения материала по стенке бункера;  $\beta$  – угол естественного откоса дробленого материала;  $f$  – коэффициент внутреннего трения (покоя) материала;

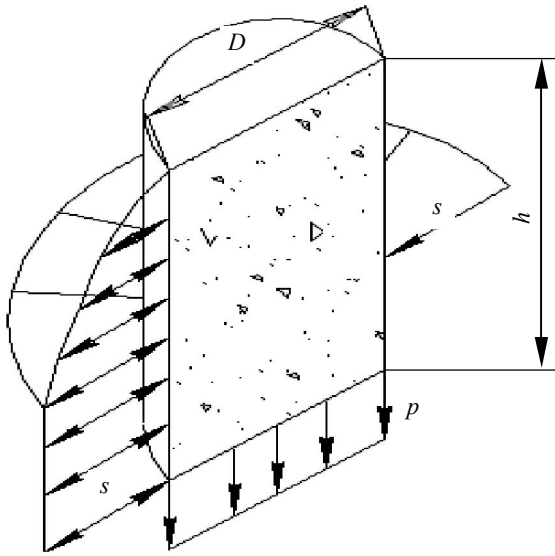


Рис.1. Распределение давления в цилиндрическом вертикальном бункере

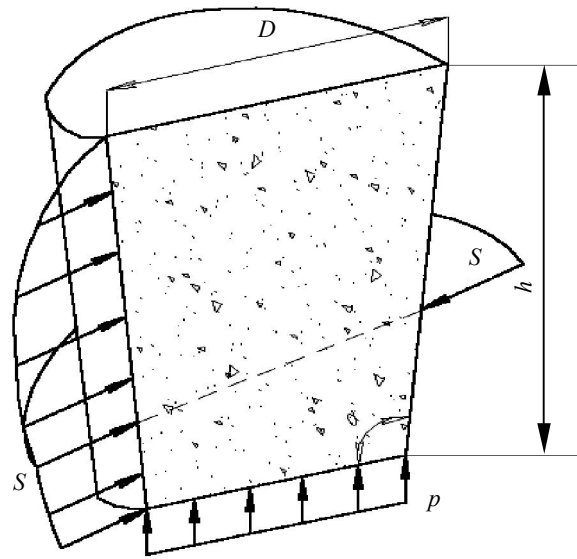


Рис.2. Распределение давления в коническом вертикальном бункере

$$u = \frac{C_1 - f_1 A_1}{C_1 - f_1 A_1};$$

$$C_1 = \sin \beta + f \cos \beta \sqrt{\frac{1 + \cos^2 \beta}{1 + \sin^2 \beta}};$$

$$A_1 = \cos \beta + f \sin \beta \sqrt{\frac{1 + \cos^2 \beta}{1 + \sin^2 \beta}}.$$

При выпуске материалов из бункера он приходит в движение. При расчете  $S$  и  $p$  следует заменить  $f_1$  на  $f_{\text{aa}1}$  ( $f_1 > f_{\text{aa}1}$ ) и  $f$  на  $f_{\text{aa}}$  ( $f > f_{\text{aa}}$ ),  $f_{\text{aa}}$  и  $f_{\text{aa}1}$  – коэффициенты трения скольжения при движении материала.

Благодаря уменьшению сил трения при движении материала в бункере нагрузка на стены может возрастать на 20-35 % по сравнению со статическим состоянием зернистой среды.

Можно воспользоваться расчетными зависимостями для определения нагрузок на стены и горизонтальные сечения в конической емкости от загруженных в нее зернистых материалов.

Распределенное нормальное давление на стену в коническом вертикальном бункере (рис.2)

$$S = \frac{\gamma D (c + 1)}{2w(2c - 1)} (a - a^{2c}).$$

Среднее вертикальное давление

$$p = \frac{\gamma D \tan \alpha}{2(2c - 1)} (a - a^{2c}),$$

где  $D$  – размер бункера по поверхности загрузки, м;  $\gamma$  – удельный насыпной вес материала,

$$\text{кг/м}^3; c = \frac{\lg u}{\lg k}; k = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}; u = \frac{c_1 v + A_1 \varpi}{c_1 v + A_1 \varpi};$$

$$v = \sin \alpha + f_1 \cos \alpha; w = \cos \alpha + f_1 \sin \alpha;$$

$$a = 1 + \frac{2h}{D \tan \alpha};$$

$h$  – глубина сечения бункера от поверхности, где определяется нагрузка, м;  $\alpha$  – угол наклона стенки бункера.

Если комбинируются цилиндрическая (сверху) и коническая (снизу) части бункера, то вертикальная нагрузка  $p_{\text{ц}}$  от материала, находящегося над верхней кромкой конической части бункера при условно невесомой массе загруженного материала в конической части бункера, производит нормальное давление на боковые стены конуса

$$S_1 = \frac{p_{\text{ц}}(\tilde{n} + 1)}{w \tan \beta} a^{2c}.$$

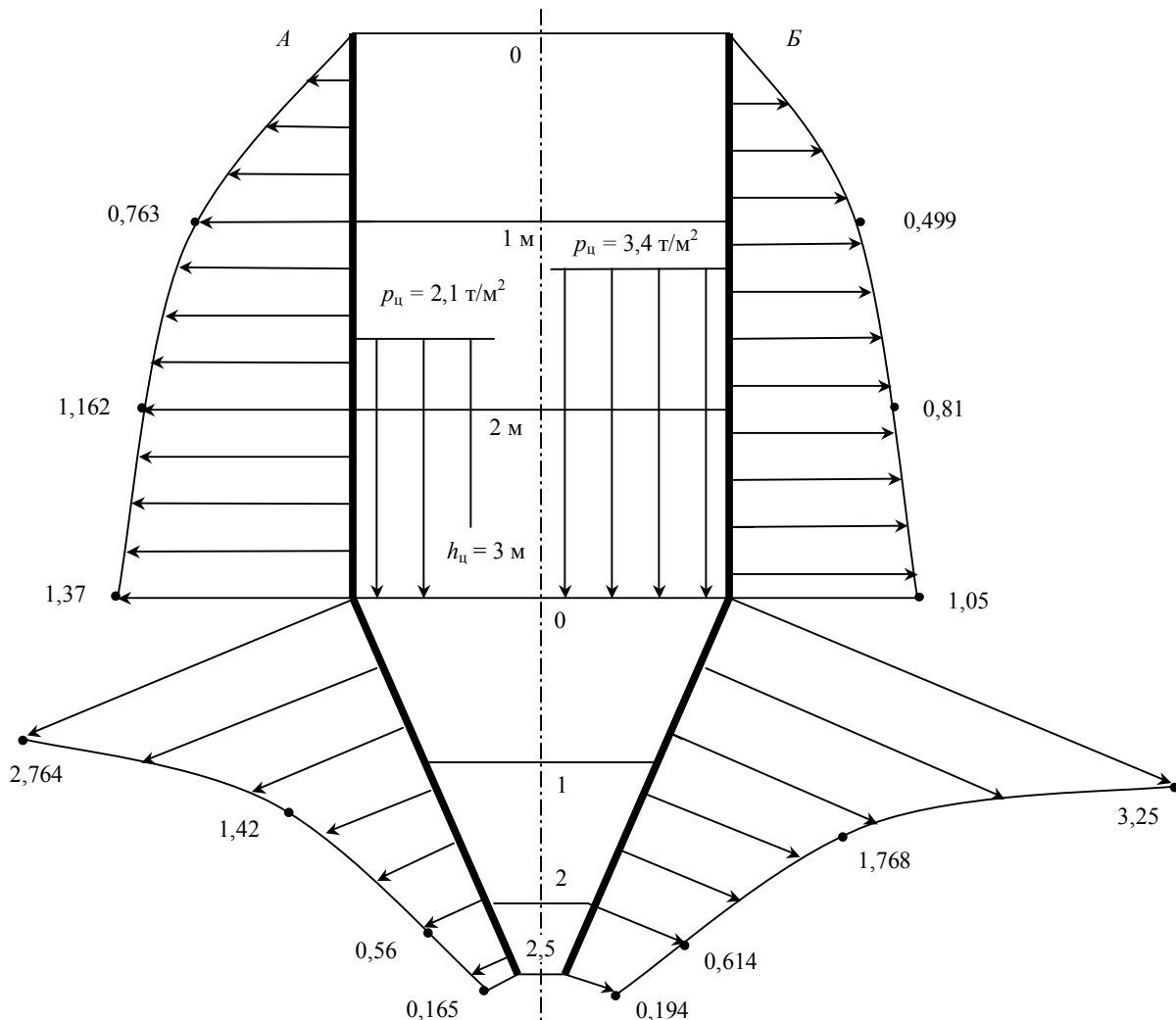


Рис.3. Распределение давления в цилиндро-коническом бункере при выпуске (А) и загрузке (Б)

Учитывая вес загруженного материала в конической части бункера и трение его по стенам, а также внутреннее трение, следует общее нормальное давление на стену конической части бункера считать по формуле

$$S_k = \frac{p_0(\tilde{n}+1)}{w \operatorname{tg} \beta} a^{2c} + \frac{\gamma D(\tilde{n}+1)}{2w(2c-1)} (a - a^{2c}).$$

Полная высота цилиндрической части бункера  $h_{\text{ц}}$  входит в параметр  $a$ , считается от верхней кромки конической части бункера. В этих расчетах требуется учитывать и некоторые ограничения при расчете параметров  $a$ ,  $c$ ,  $w$ ,  $v$ ,  $u$  и др., например, при высоких значениях коэффициента трения

материала о стены бункера  $f_1$  и низких значениях коэффициента внутреннего трения  $f$  частицы загруженной массы будут перекапываться по стене, проскальзывая по контактирующим поверхностям соседних частиц. Давление на стены и дно будет тогда считаться по несколько преобразованным формулам, предложенные расчетные зависимости действуют при условиях:

$$f > f_1 A_1;$$

$$f < \sqrt{\frac{1 - \sin 4\beta}{1 - \cos 4\beta}};$$

$$0 < u < 1.$$

Рассмотрим пример расчета нагрузок на стены бункера с высотой верхней цилиндрической части  $h_{\text{ц}} = 3$  м, нижней конической  $h = 2,5$  м, плотность материала (насыпной вес)  $\gamma = 1,6 \text{ т/м}^3$ , угол наклона стены конуса  $\alpha = 110^\circ$ , угол естественного откоса руды при свободном насыпании  $\beta = 36^\circ$ , коэффициент внутреннего трения руды  $f = 0,7$  и коэффициент трения руды по внутренней поверхности стенки бункера  $f_1 = 0,6$  (рис.3).

Как показывает расчет, при движении материала возрастает давление на стены цилиндрической части бункера и понижается нормальное давление на стены конической части и на горизонтальные слои движущегося материала, что подтверждается лабораторными исследованиями и практикой использования породоспусков. Такой результат интересен еще и тем, что показывает родство сыпучей среды и жидкости.