

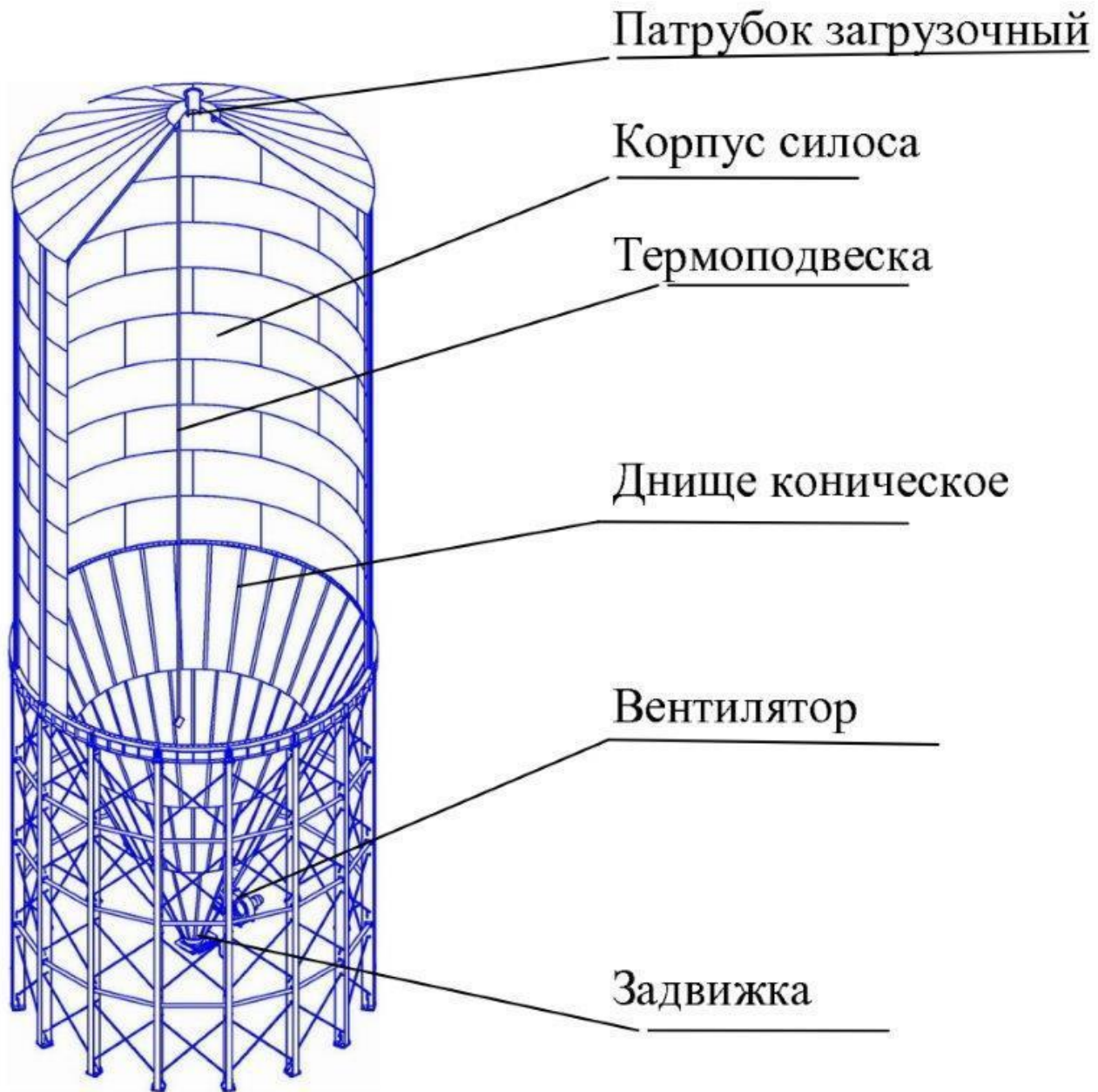
Силосы и Бункеры



Спикеры: Васнин Д.С.
Залесова П.С.
Исмаилова Д.Л.
Совместно с: Ямковой А.С.

Сило́с и бункер — склад для хранения сыпучих материалов, таких как цемент, песок, зерно, комбикорм, гранулы и т. п.; представляет собой ёмкость цилиндрической формы с коническим дном.





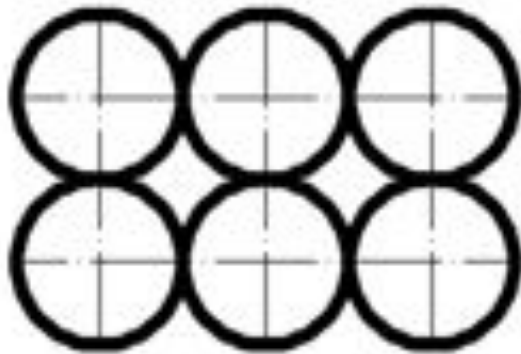
Виды



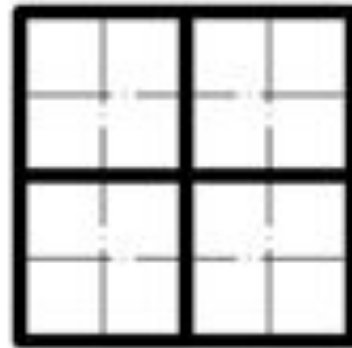
По сечению

- a) Круглого сечения
- b) Квадратного сечения

a)

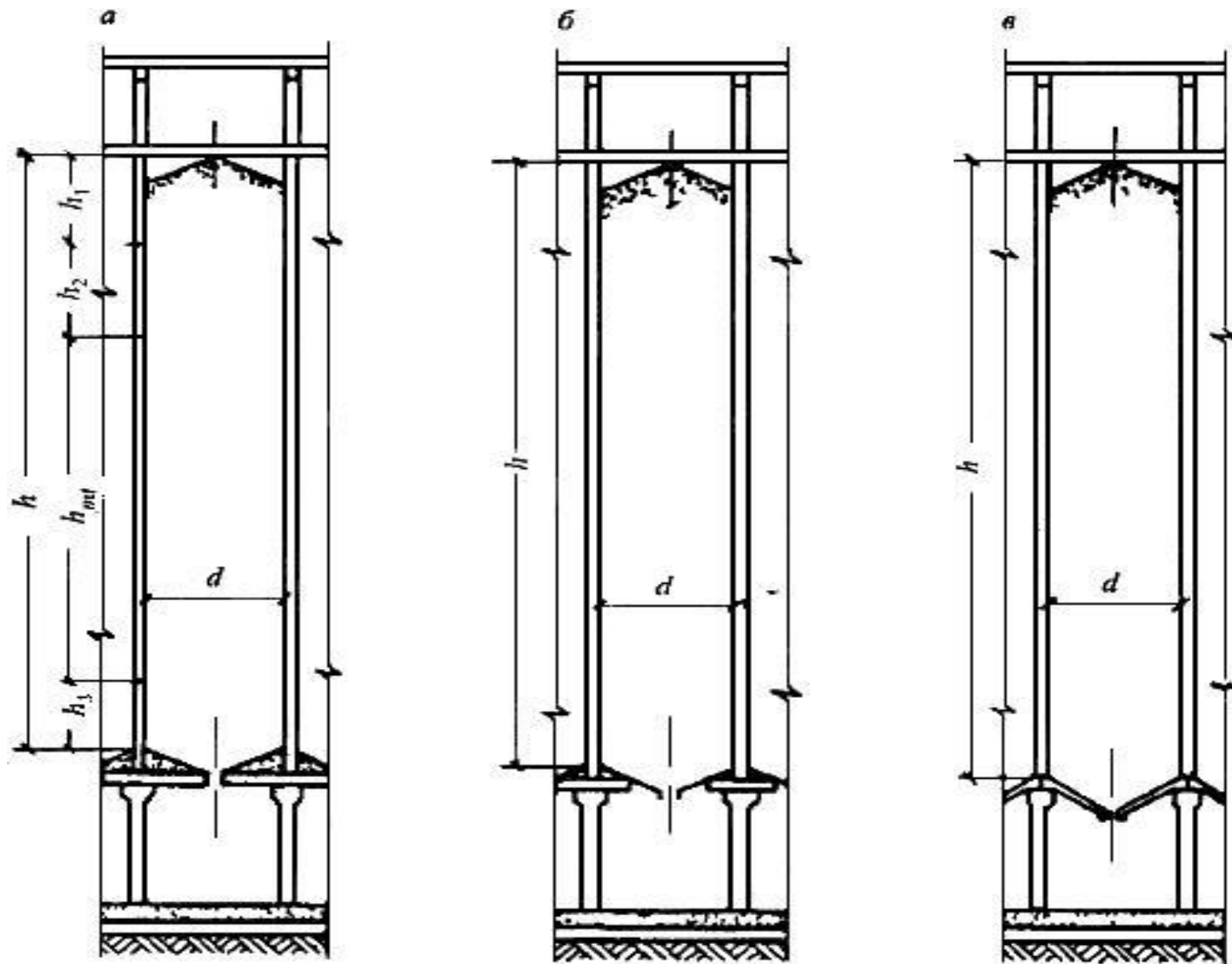


б)



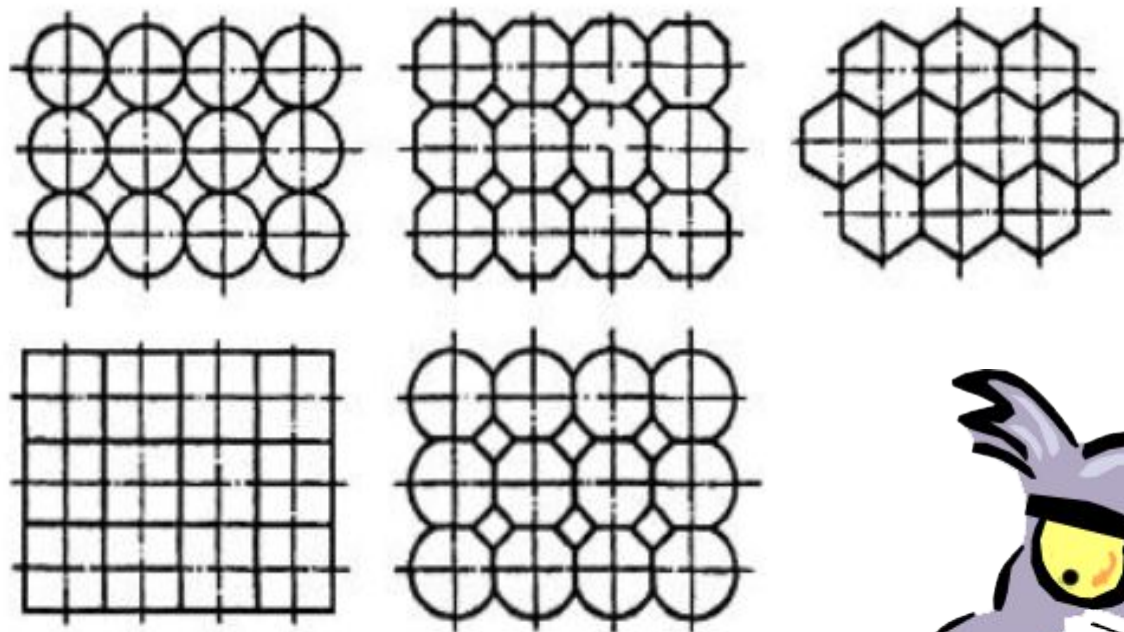
Составные элементы силоса

- **Стенка силоса** – цилиндрическая часть силоса;
- **Дно** – плоское либо конусовидное, с выгрузным отверстием задвижного типа посередине. Крепится к нижнему опорному кольцу;
- **Покрытие**;
- **Система вентиляции** – воздухопроводящие трубки, холодильники либо калориферы, несколько вентиляторов, обеспечивающих воздухообмен.
- **Колонны подсилосного этажа**

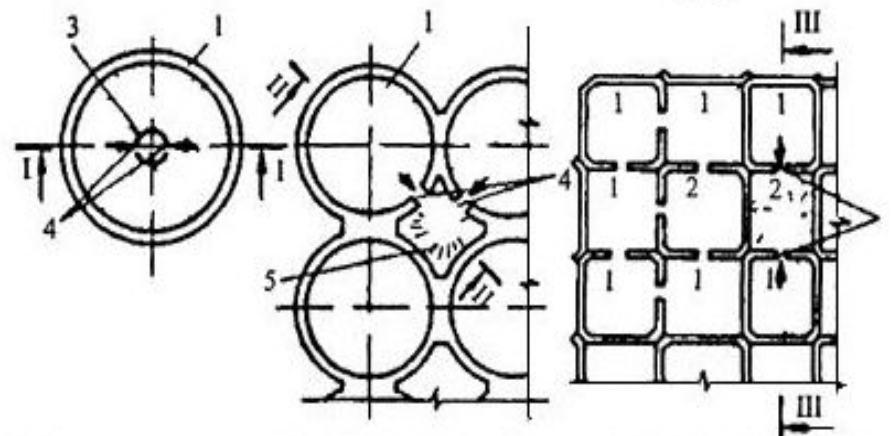
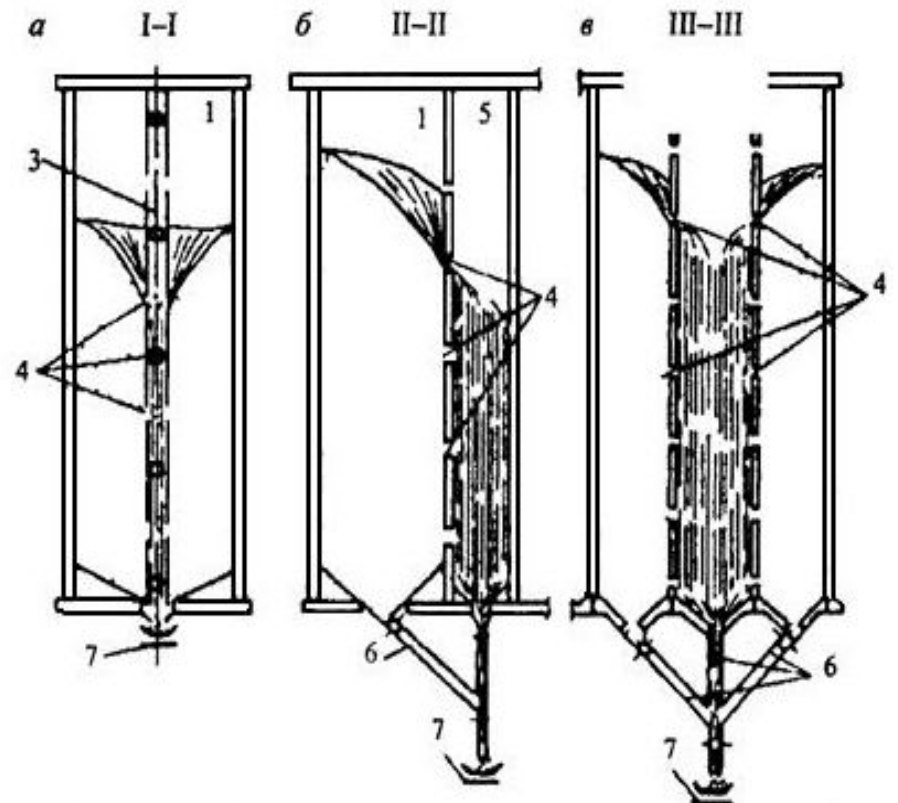


h - высота стен силосов; h_1 - высота верхней зоны; h_2 - высота второй зоны; h_3 - высота нижней зоны; h_{mt} - высота средней зоны; d - внутренний диаметр силоса

Планы силосных корпусов



Выпуск сыпучего материала

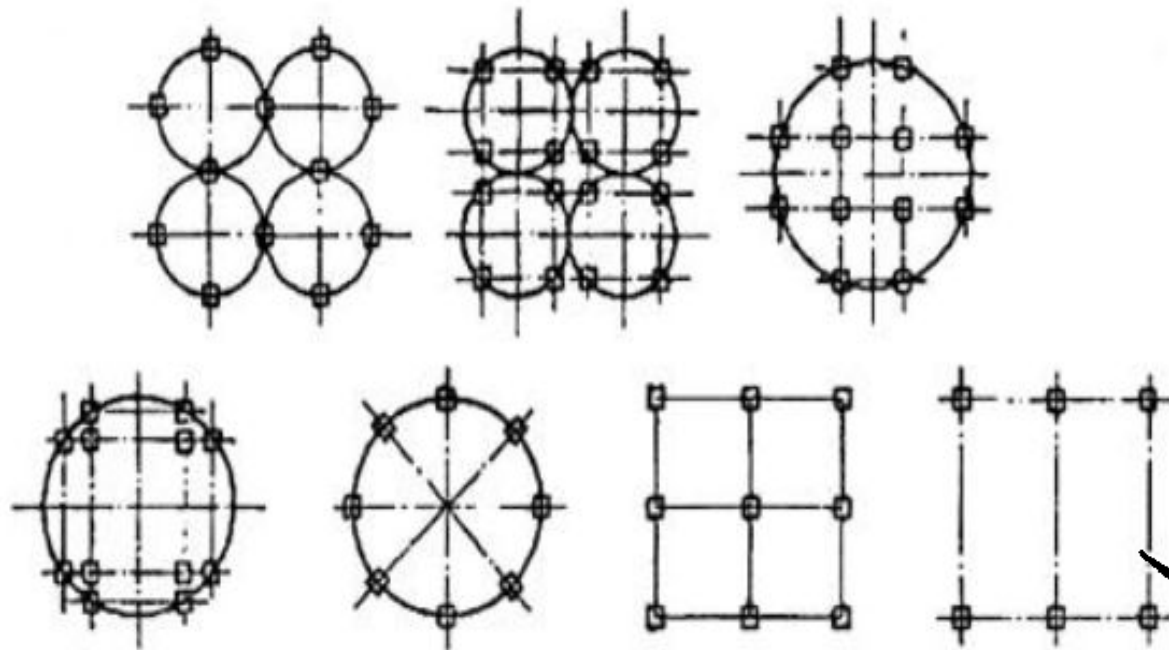


a – через разгрузочную трубу (I-I)

б – через звездочку (II-II)

в – через внутренний силос (III-III)

Схемы расположения колонн подсиленного этажа



Сбор нагрузок

К постоянным нагрузкам относятся нагрузки от собственного веса элементов конструкций силосов.

- **временные** – от веса сыпучих материалов, части горизонтального давления и трения сыпучих материалов о стены силосов, веса технологического оборудования, крена и неравномерных осадок;
- **кратковременные** – возникающие при изготовлении, перевозке и монтаже конструкций, при изменении температур наружного воздуха, от части горизонтального неравномерного давления сыпучих материалов, от давления воздуха, нагнетаемого в силос при активной вентиляции и гомогенизации;

Учет коэффициента надежности по нагрузке γ_f

Коэффициенты надежности по нагрузке для собственного веса конструкций, полезной нагрузки на перекрытиях, снеговой и ветровой нагрузок принимаются по [СП 20.13330](#):

при горизонтальных и вертикальных давлениях от сыпучих материалов 1,3;

при температурных воздействиях и от давления воздуха в силосе 1,1.

Классы требований

В зависимости от номинального объема и особенностей эксплуатации силосы подразделяют на следующие классы требований:

- класс требований КС-1 - силосы с номинальной емкостью до 1000 т включительно;
- класс требований КС-2 - силосы с номинальной емкостью более 1000 т.

Класс требований силоса следует учитывать при назначении:

- требований к материалам, методам изготовления, объемам контроля качества;

- коэффициентов надежности по ответственности.

Коэффициент надежности по ответственности силоса и коэффициенты условий работы основных конструктивных элементов силоса при расчетах на прочность следует назначать в соответствии с таблицами 8.1 и 8.2.

Таблица 8.1 - Коэффициент надежности по ответственности γ_n

Класс силоса по 5.2.1	Уровень ответственности	Значение γ_n
КС-2	Нормальный	1,1
КС-1	Нормальный	1,0

Таблица 8.2 - Коэффициенты условий работы основных конструктивных элементов силоса γ_c

Наименование конструктивного элемента силоса	Значение γ_c
Стенка	0,8
Днище	0,8
Крыша	1,0
Зона сопряжения стенки с днищем при проверке прочности на дополнительные местные напряжения с учетом развития пластических деформаций	1,4

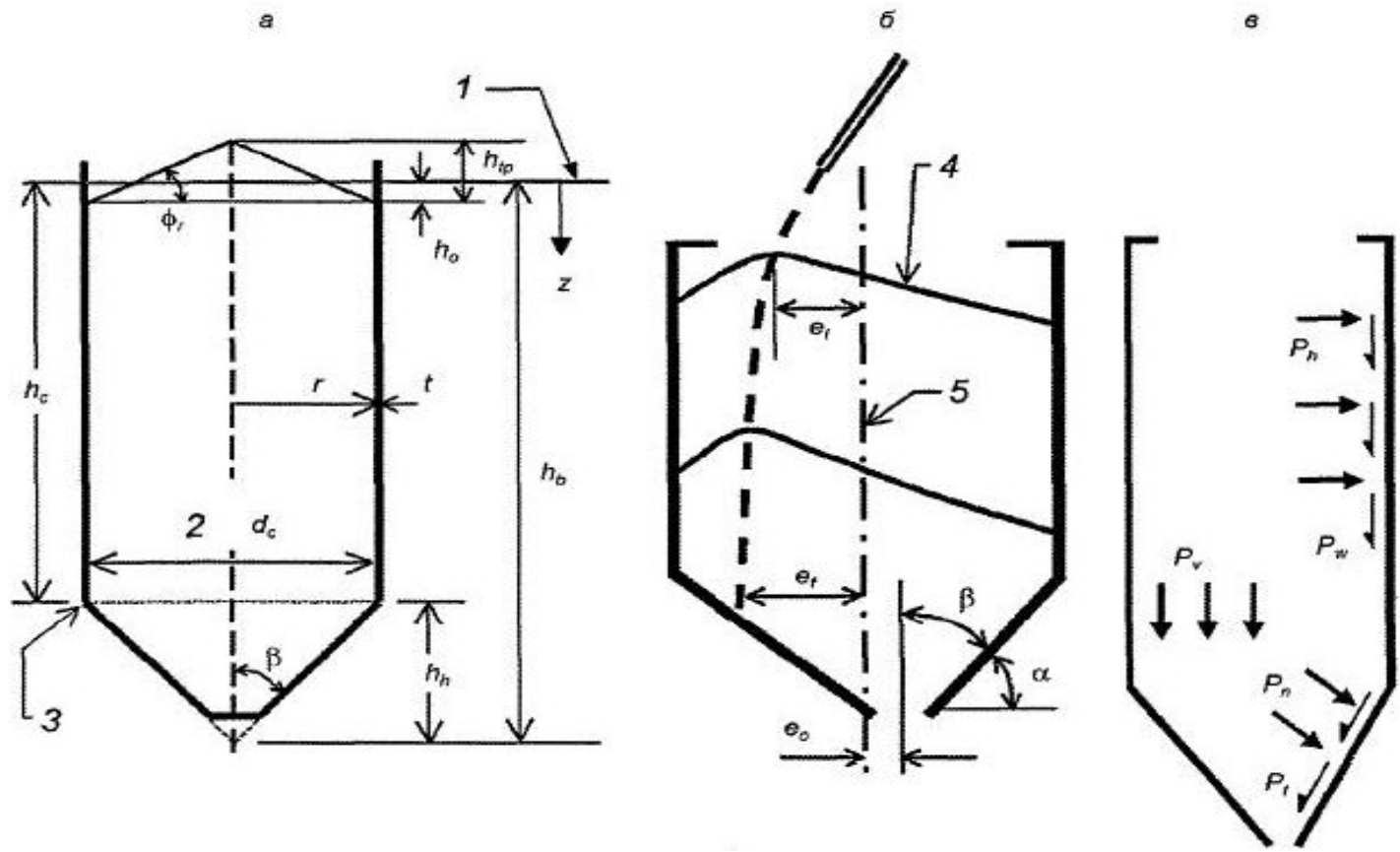
Определение нагрузок при заполнении и разгрузке сыпучего материала должно выполняться по основным случаям нагружения, которые могут привести к разным расчетным ситуациям:

- максимальные горизонтальные нагрузки, перпендикулярные вертикальной стенке силоса;
- максимальные вертикальные нагрузки от трения;
- максимальные вертикальные нагрузки на дно силоса;
- максимальные нагрузки на воронку силоса.

Для расчета нагрузок в силосах учитывают следующие нагрузки:

- при заполнении на вертикальные участки стенки;
- при разгрузке на вертикальные участки стенки;
- на воронку при заполнении;
- на воронку при разгрузке;
- при заполнении и разгрузке через выпускное отверстие.

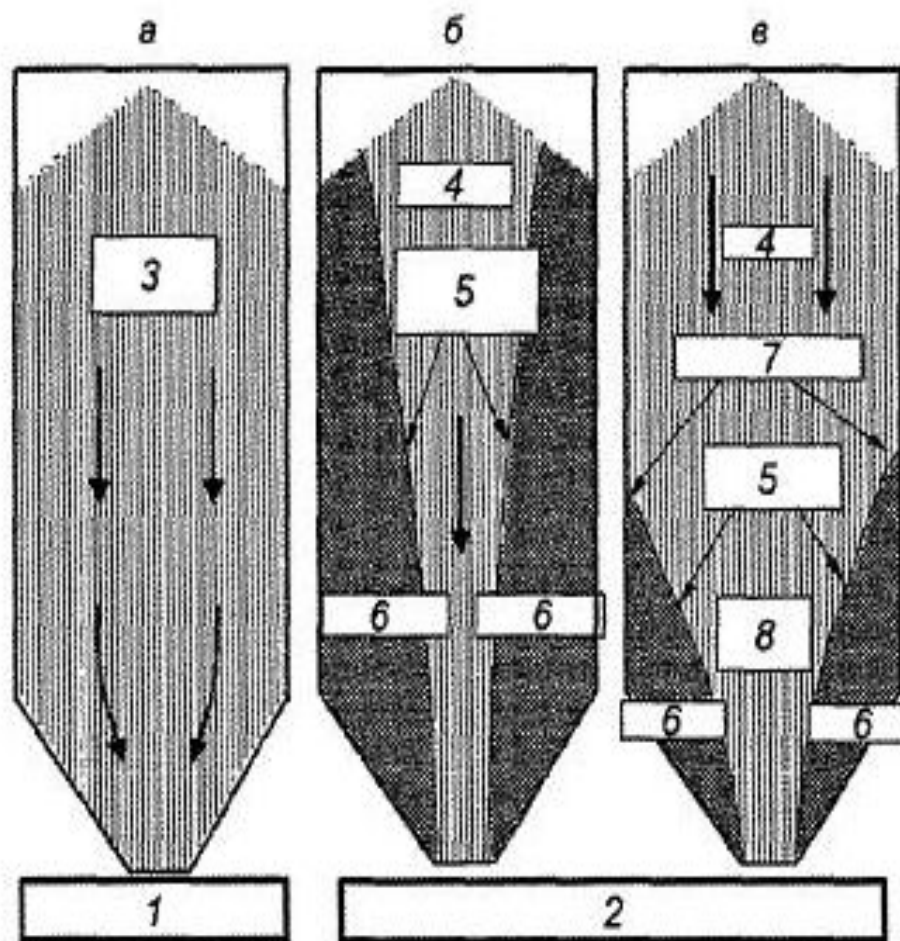
Силосы с различной гибкостью (отношение высоты к диаметру), геометрией воронки и расположением выпускных отверстий приводят к различным расчетным ситуациям



а - геометрические размеры; б - эксцентриситеты; в - нагрузки; г - форма поперечного сечения; 1 - эквивалентная поверхность сыпучего продукта; 2 - внутренний размер; 3 - зона перехода; 4 - профиль поверхности при полном силосе; 5 - ось силоса

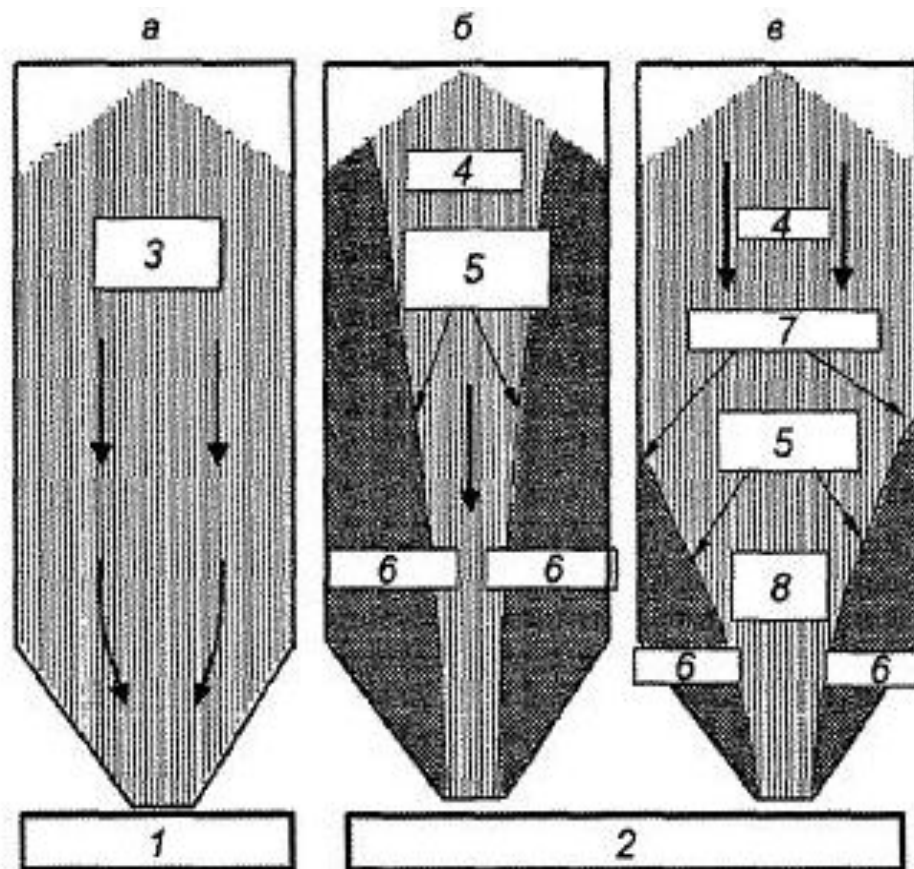
При расчете силосов следует учитывать влияния профилей текучести при разгрузке, которые могут разделяться на следующие категории :

- массовый поток;
- внутренний поток;
- смешанное течение.



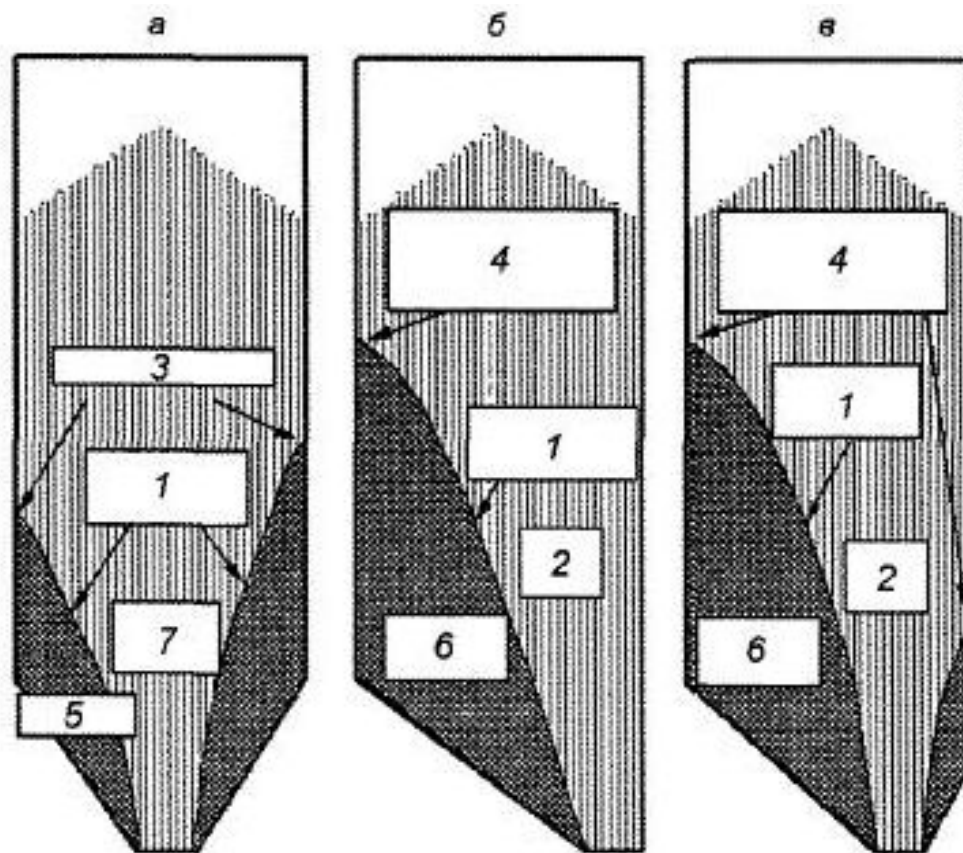
а - массовый поток; б - внутренний поток; в - смешанное течение потока; 1 - схема с массовым потоком; 2 - схемы с центральным потоком; 3 - весь продукт в движении; 4 - текущий продукт; 5 - границы канала течения; 6 - продукт в покое; 7 - переход продукта; 8 - воронка течения

Профили текучести продукта с различными каналами течения



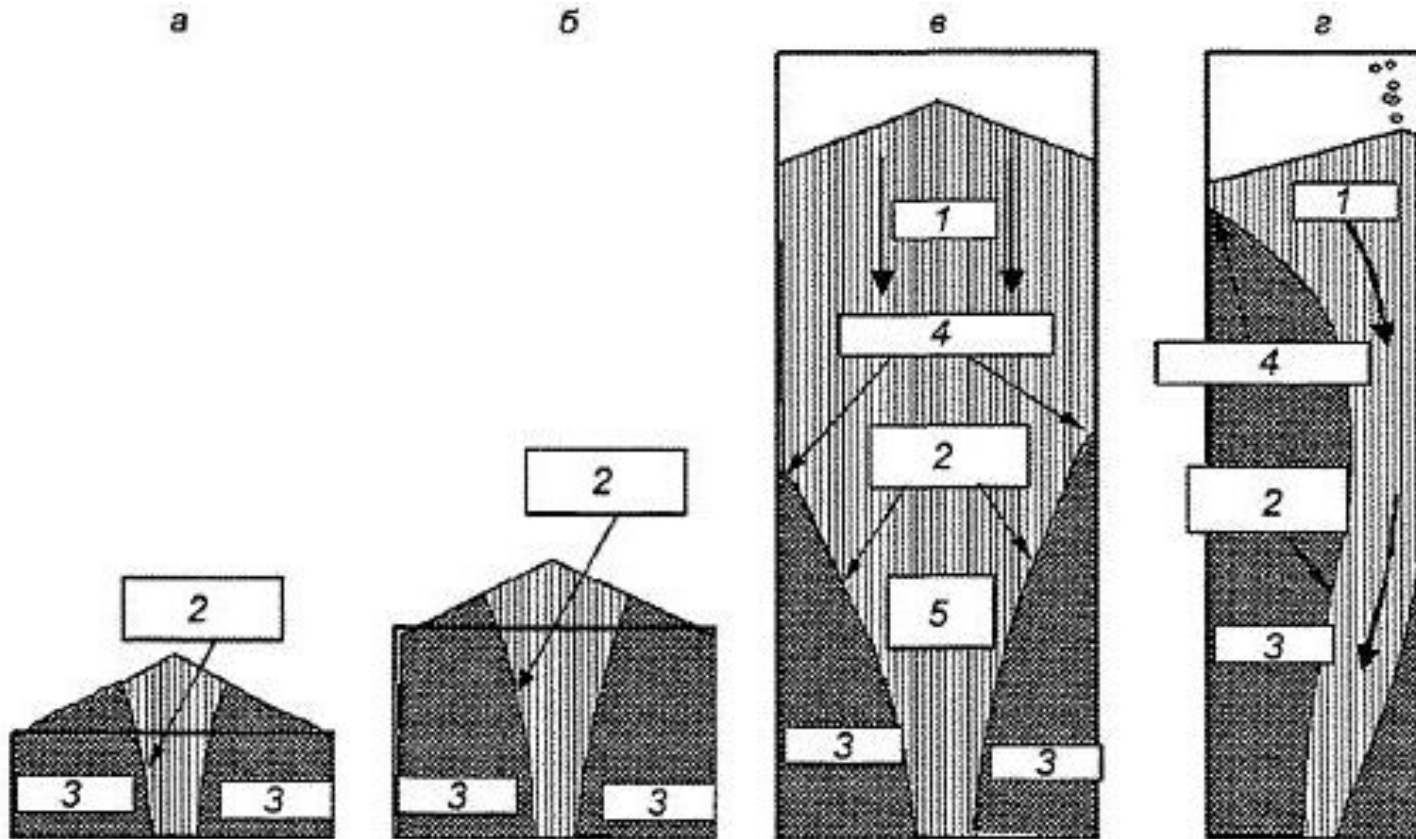
а - массовый поток; б - внутренний поток; в - смешанное течение потока; 1 - схема с массовым потоком; 2 - схемы с центральным потоком; 3 - весь продукт в движении; 4 - текущий продукт; 5 - границы канала течения; 6 - продукт в покое; 7 - переход продукта; 8 - воронка течения

Профили текучести со смешанным течением продукта



а - концентрическое смешанное течение; б - полностью эксцентрическое смешанное течение; в - частично эксцентрическое смешанное течение; 1 - границы канала течения; 2 - зона течения; 3 - переход продукта; 4 - переход продукта меняется по периметру силоса; 5 - границы канала течения; 6 - сыпучий продукт в покое; 7 - воронка течения

Соотношение сторон (гибкость) при смешанных и внутренних моделях потока продукта



а - силос с опорной стенкой; б - низкий силос; в - гибкий силос; г - силос с большой гибкостью; 1 - сыпучий продукт в покое; 2 - границы канала течения; 3 - эффективная воронка течения; 4 - переход продукта; 5 - течение продукта

Расчет стенки силоса

Удельный вес сыпучих материалов γ , их угол внутреннего трения φ и коэффициент трения сыпучих материалов о стены силоса f необходимо принимать в соответствии с приложением В СП108.13330.2012.

Равномерно распределенное по периметру нормативное горизонтальное давление сыпучих материалов p_h^n на стены силосов на глубине z от верха засыпки вычисляется по формуле

$$p_h^n = \frac{\gamma\rho}{f} \left(1 - e^{-\frac{\lambda fz}{\rho}}\right)$$

где ρ - гидравлический радиус поперечного сечений силоса, определяемый по формуле

$$\rho = \frac{A}{U}$$

где A - площадь поперечного сечения силоса;

U - периметр поперечного сечения силоса;

λ - коэффициент бокового давления сыпучего материала, определяемый по формуле:

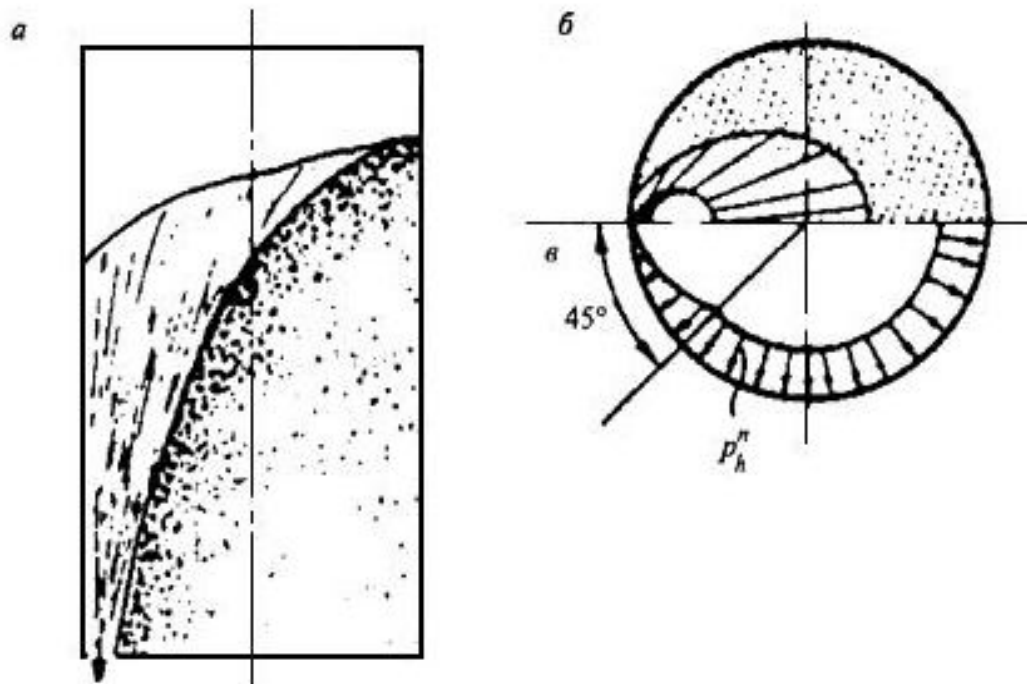
$$\lambda = \operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)$$

(для зерна допускается принимать $\lambda = 0,44$);

e - основание натурального логарифма.

Если из силоса диаметром 12 м и более производится пристенный выпуск сыпучего материала с образованием воронки потока сыпучего материала у стены силоса, то следует учитывать понижение горизонтального давления сыпучего материала над выпускным отверстием на всю высоту силоса, при этом схема распределения горизонтального давления принимается по рисунку

Схема распределения горизонтального давления



а - разрез силоса; б - план; в - эпюра давления

● Кольцевое горизонтальное давление сыпучих материалов на стены круглых силосов принимается равномерно распределенным по всему периметру стен силосов.

Нормативное значение кольцевого горизонтального давления p_{h1}^n вычисляется по формуле

$$p_{h1}^n = \alpha_1 * p_h^n$$

где α_1 - коэффициент местного повышения давления, принимаемый по табл.1 СП 108.13330.2012

Нормативное значение вертикального давления сыпучего материала p_f^n , передающегося на стены силоса силами трения, вычисляется по формуле

$$p_f^n = f * p_h^n$$

● Температурные воздействия от суточного изменения температуры наружного воздуха и перепада температуры по толщине стен допускается заменять дополнительным горизонтальным давлением сыпучего материала на наружные стены заблокированных или отдельно стоящих силосов, считая его равномерно распределенным по периметру и высоте. Нормативное значение этого давления p_{ht}^n вычисляется по формуле:

$$p_{ht}^n = \frac{k_t * \alpha_t * T_1 E_m}{\frac{d}{2t} * \frac{E_m}{E_c} + (1 - \nu)}$$

где T_1 - суточная амплитуда температуры наружного воздуха, принимаемая по [СП 20.13330](#);

E_m - модуль деформации сжатия сыпучего материала;

E_c - модуль упругости материала стен силосов;

k_t - коэффициент равный: 2 - для стальных и монолитных железобетонных стен силосов;

α_t - коэффициент линейной температурной деформации материала стен;

d - внутренний диаметр силоса;

t - толщина стен;

ν - начальный коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона), принимаемый для зерновых продуктов равным 0,4.

Допускается давление p_{ht}^n вычислять по формуле

$$p_{ht}^n = k_{t1} p_h^n$$

где k_{t1} - коэффициент, принимаемый равным 0,4 (для стальных стен силосов).

Кроме кольцевых напряжений в стенке возникают и меридиональные напряжения (осевые) от вертикальных нагрузок, к которым относят:

- Собственный вес покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования G_o (кН):

$$G_o = \gamma_{fg} G_{on} \pi r^2$$

γ_{fg} – коэффициент надежности по нагрузке для собственного веса металлоконструкций, принимаемый равным 1,05;

G_{on} – нормативное значение распределенной нагрузки от веса покрытия, площадок ограждения и стационарного оборудования, приблизительно может быть определено по обобщенным показателям в зависимости от объема резервуара

r – радиус срединной поверхности пояса стенки;

- Вес металлоконструкций выше расчетной точки G_M (кН):

$$G_M = \gamma_{fg} 2\pi r \rho_M g H_{ст,i} t_i$$

ρ_M - плотность стали;

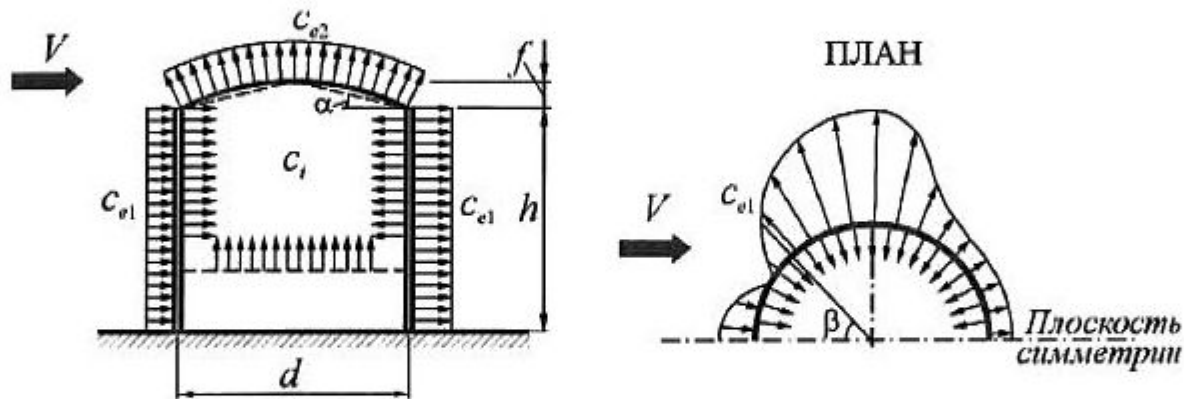
$H_{ст,i}$ высота стенки выше рассматриваемого уровня;

t_i - номинальная толщина стенки.

- Нагрузка от снега, находится согласно СП 20.13330.2016

Снеговую нагрузку на конусные покрытия одиночных силосов необходимо принимать с коэффициентом 0,4, с распространением этой нагрузки по всей площади покрытия или по ее половине.

- Ветровая нагрузка рассчитывается согласно СП20.13330.2016 п. В 1.12



• Расчет на прочность

Проверка прочности стенки выполняется по приведенным и по кольцевым напряжениям:

$$\frac{1}{R_y \gamma_c} \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq 1$$

где σ_x и σ_y - нормальные напряжения по двум взаимно перпендикулярным направлениям;

γ_c - коэффициент условий работы конструкций;

$$\sigma_1 = pr / (2t)$$

$$\sigma_2 = pr / t$$

где p - расчетное внутреннее давление на единицу поверхности оболочки;

r - радиус срединной поверхности

Расчет на устойчивость ведется для двух вариантов:

- Силос без нагружения сыпучим материалом;
- Силос с нагружением сыпучим материалом.

Расчет ведется согласно СП16.13330.2017, п.11.2

Места изменения формы силоса, в частности зона сопряжения цилиндрической части с конусной или с плоским днищем, а также места резкого изменения нагрузок должны быть проверены на дополнительные местные напряжения (краевой эффект) по [СП 16.13330](#) с коэффициентом условий работы $\gamma_c = 0,8$

Расчет конуса

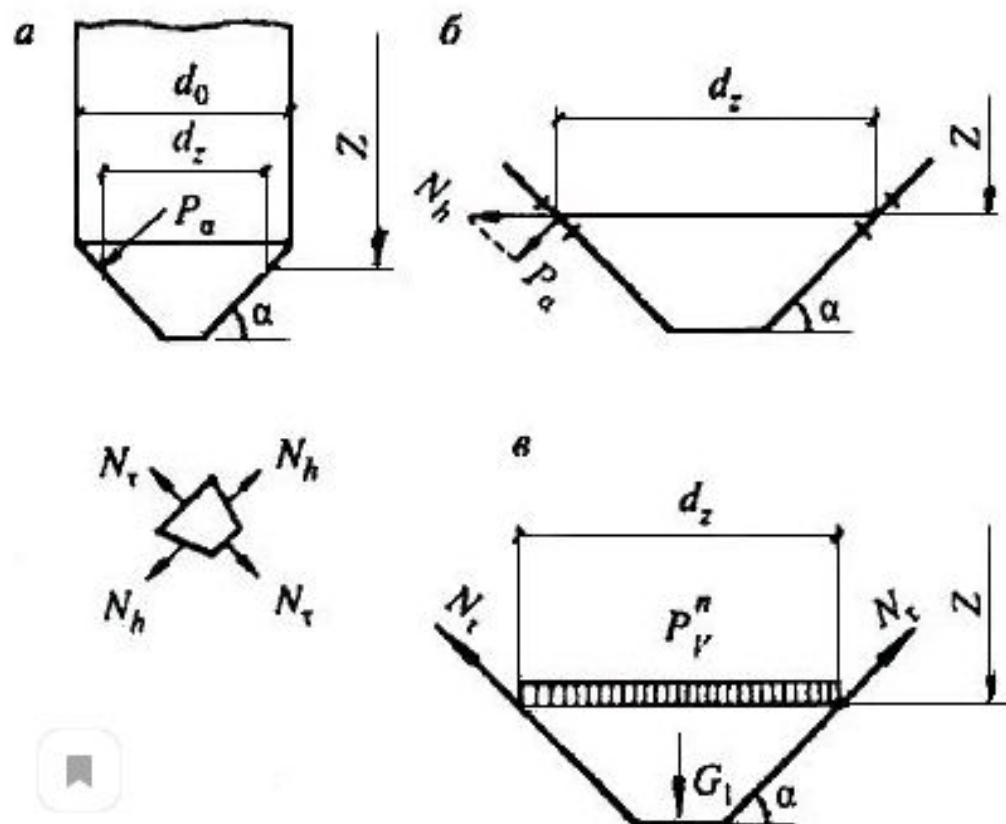
Расчет конических воронок стальных силосов на прочность необходимо выполнять на горизонтальное растягивающее усилие конической оболочки в кольцевом направлении и на растягивающее усилие конической оболочки в направлении образующей.

Расчетные растягивающие продольные силы в конической воронке – горизонтальную N_h в меридиональном сечении и N_τ , действующую вдоль образующей воронки под углом α к горизонту в кольцевом сечении, следует определять по формулам:

$$N_h = \frac{1}{\gamma_c} \left(\gamma_f \cdot p_\alpha^n + \gamma_{f1} \cdot g \cdot \cos \alpha \right) \cdot \frac{dz}{2 \sin \alpha}$$

$$N_\tau = \frac{\gamma_f}{\gamma_c} \left(\frac{p_v^n}{4 \sin \alpha} + \frac{G}{\pi dz \sin \alpha} \right)$$

- где γ_{f1} — коэффициент надежности по нагрузке от собственного веса воронки силоса;
- g — собственный вес единицы площади стенки воронки;
- G — вес части воронки с сыпучим материалом, расположенной ниже плоскости сечения.

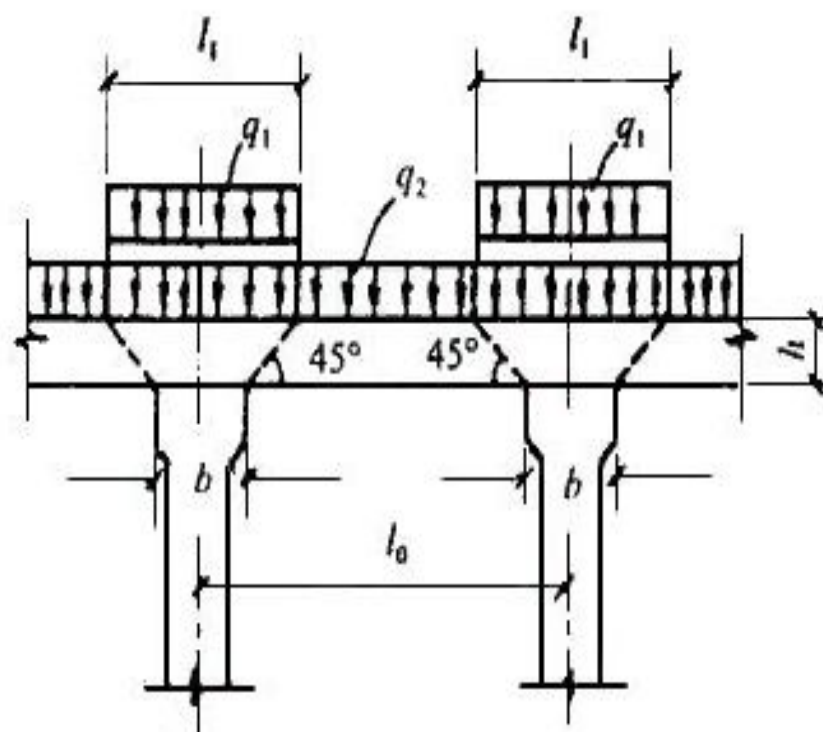


а - обозначение размеров воронки; б - схема для определения горизонтального растягивающего усилия; в - схема для определения меридионального (вдоль ската) усилия

Рисунок 9 - Расчетные схемы конической воронки

8.5.2 Грани пирамидальных воронок следует рассчитывать на местный изгиб (из плоскости грани) от давления совместно с растягивающими продольными силами в вертикальных и горизонтальных сечениях воронки.

8.5.3 Балки днища необходимо рассчитывать на нагрузки, передающиеся через стены и днища (или воронки) силоса, принимая, что нагрузка от стен силосов q_1 передается на балку в виде равномерно распределенной на длине l_1 .



q_1 - нагрузка от стены силоса; q_2 - нагрузка от днища (воронки); l_1 - расчетная длина опирания стены силоса на балку; h - высота балки; b - ширина оголовка колонн; l_0 - расстояние между осями колонн

Рисунок 10 - Передача нагрузки от балки на колонну



Нагрузку от днища q_2 , а также нагрузку от стен силосов при $l_1 > l_0$ следует принимать равномерно распределенной по периметру балки.

8.5.4 При расчете плоских наклонных днищ и балок днищ усилия следует определять как в обычных перекрытиях с учетом давления сыпучих материалов и коэффициента условий работы γ_c , приведенного в приложении Г.

Нормативные давления сыпучего материала на наклонную под углом α к горизонту поверхность днищ или воронок силосов вычисляются по формулам

нормальное к поверхности воронки или днища

$$p_{\alpha}^n = p_v^n (\sin^2 \alpha + \lambda \sin^2 \alpha)$$

касательное к поверхности воронки или днища

$$p_{\tau}^n = p_v^n (1 - \lambda) \sin \alpha \cos \alpha$$

8.2.3 Зону сопряжения стенки силоса с плоским днищем или воронкой следует конструировать и рассчитывать с учетом краевого эффекта.

8.2.4 Сжатые элементы жесткости зоны сопряжения стенки силоса с воронкой следует рассчитывать на устойчивость.

Расчет колонн

Колонны рассчитываются, как центрально сжатые стержни, имеющие жесткое закрепление у основания.



Все постоянные, длительные и кратковременные нагрузки равномерно распределяются среди всех колонн силоса.
Расчет колонн ведется на потерю несущей способности и потерю устойчивости.

Согласно сп.16.13330.2016 :

Расчет по потери несущей способности:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1$$

Расчет по потери устойчивости:

$$\frac{N}{\varphi_c A R_y \gamma_c} \leq 1$$

где **N** — нагрузка на сжатие/растяжение;

A — площадь поперечного сечения профиля брутто, т.е. без учета ослабления его отверстиями;

R_y — расчетное сопротивление стали;

γ_c — коэффициент условий работы (см. Таблицу 1 СП 16.13330);

φ — коэффициент устойчивости при центральном сжатии.

Как видим эта формула очень напоминает предыдущую, но здесь появляется коэффициент φ , чтобы его вычислить нам вначале потребуется вычислить условную гибкость стержня

$$\bar{\lambda} - \text{условная гибкость } \bar{\lambda} = \lambda \sqrt{R_y/E}$$

где R_y — расчетное сопротивление стали;

E — модуль упругости;

λ — гибкость стержня, вычисляемая по формуле:

где l_{ef} — расчетная длина стержня;

i — радиус инерции сечения.

Расчетные длины l_{ef} колонн (стоек) постоянного сечения или отдельных участков ступенчатых колонн согласно СП 16.13330 п. 10.3.1 следует определять по формуле

$$l_{ef} = \mu l$$

- где l — длина колонны;
- μ — коэффициент расчетной длины.

Коэффициенты расчетной длины μ колонн (стоек)

постоянного сечения следует определять в зависимости от условий закрепления их концов и вида нагрузки

Но при ветровой нагрузке следует учитывать

перераспределение нагрузок на колонны: часть колонн будет догружена, а часть разгружена.

Расчетная длина колонн может быть уменьшена введением связей по колоннам, что в колоннах силосов обычно и применяется

Покрытие

Нагрузки для расчета:

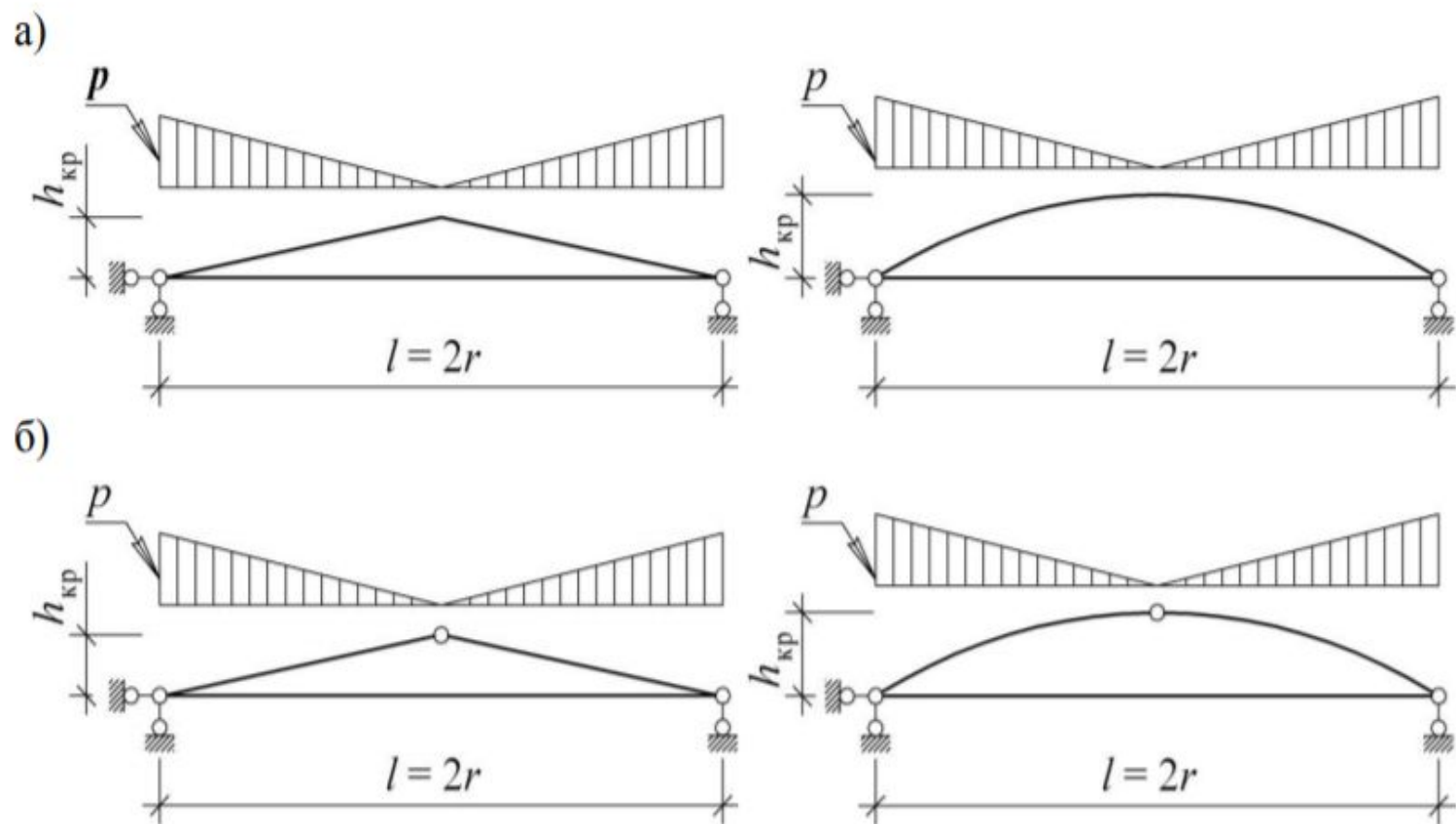
- Нагрузка от собственного веса
- Нагрузка от веса оборудования и т.д.
- Снеговая нагрузка

Для резервуаров без центральной стойки щитовая крыша представляет собой распорную конструкцию. Распор вызывает сжимающие усилия в радиальных балках и требует для своего восприятия опорного кольца.

Покрытие расчленяется на отдельные плоские арки, включающие по два диаметрально противоположных ребра.

Радиальные рёбра могут быть рассчитаны по схеме трёхшарнирной или двухшарнирной арки, в зависимости от узла примыкания радиальных рёбер к центральному опорному кольцу. Поскольку покрытие имеет по наружному контуру общее для всех щитов кольцо жёсткости, то оно может рассматриваться как общая затяжка для всех арок. Поэтому каждую арку можно рассчитать как плоскую арку с условной затяжкой (рис. 6.11).

Расчёт может быть выполнен численно с помощью компьютерных программ или аналитически – методами строительной механики.



а) двухшарнирные арки, б) трёхшарнирные арки

Рис.6.11 – Варианты расчётных схем радиальных балок

Конструктивный расчет

Проверку прочности сплошных арок производят как для внецентренно-сжатых элементов при упругой работе стали для наиболее неблагоприятных сочетаний усилий:

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W_x} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}, \quad (6.106)$$

где N – продольное усилие в радиальном ребре;

A – площадь поперечного сечения ребра;

M – момент в радиальном ребре;

W_x – момент сопротивления сечения;

γ_c – коэффициент условий работы, равный 1.

Проверка устойчивости арки в плоскости действия момента приближенно выполняется как для центрально сжатого стержня:

$$1,4N \leq \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{\mu^2 \cdot s^2}, \quad (6.107)$$

где s – длина полуарки:

для конической кровли $s = l_{\text{рад.р.}} = \sqrt{r^2 + h_{\text{кр}}^2}$;

для сферической кровли $s = \beta \cdot R_{\text{пов}}$,

β – угол в радианах, $\beta = \text{arctg} \frac{r}{R_{\text{пов}} - h_{\text{кр}}}$;

μ – коэффициент расчетной длины, учитывающий кривизну арки и зависящий от отношения стрелки арки к пролёту (табл. 6.10).

Таблица 6.10 – Коэффициенты μ расчётной длины арки

Арка	$h_{кр}/l$			
	0,05	0,2	0,3	0,4
Трехшарнирная	1,2	1,2	1,2	1,3
Двухшарнирная	1	1,1	1,2	1,3

Общая устойчивость арки из плоскости проверяется по формуле (56) [2]:

$$\frac{N}{c \cdot \varphi_y \cdot A} \leq \frac{R_y \cdot \gamma_c}{\gamma_n}. \quad (6.108)$$

Для обеспечения устойчивости сплошной арки из плоскости расстояние между точками закрепления (поперечные ребра) не должно превышать 16-20 ширин пояса [9].

Спасибо за
внимание

