

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №4

**ТЕМА: «Расчет бункеров, затворов, наклонных лотков» (4 часа)**

*Цель работы:* Ознакомление с устройством и принципом работы бункеров, наклонных лотков, затворов, выполнение проектного расчета.

### 4.1 Краткие теоретические сведения.

Основными свойствами сыпучих и мелкозернистых материалов, которые надо учитывать при транспортировании, являются: гранулометрический состав, угол естественного откоса в покое и в движении, плотность, коэффициент трения между материалом и поверхностью, состояние материала.

Свободно насыпанный на горизонтальную поверхность материал образует конус, угол наклона образующей которого к горизонтальной поверхности является углом естественного откоса материала в покое  $p_1$ . Если материал поместить на движущуюся поверхность, то в результате толчков и встряхивания угол естественного откоса уменьшается. Такой угол называют углом естественного откоса материала в движении:

$$p_2 \approx 0,7 p_1. \quad (4.1)$$

Плотность – масса единицы объема материала при насыпке его без уплотнения, обычно измеряется в килограммах на кубический метр.

Коэффициент трения материала о поверхность обуславливает углы наклона стенок бункеров, лотков, конвейеров. Коэффициент трения  $f = \operatorname{tg} \varphi$ , где  $\varphi$  – угол трения, град.

Транспортируемый материал может быть хрупким, липким, абразивным и пылящим. Характеристика свойств материалов, учитываемых при выборе транспортирующего оборудования, приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Характеристики транспортируемых материалов

Наименование материалов	Плотность $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	Угол естественного откоса $p_1^0$ , град.	Коэффициент трения $\mu$ ( $\varphi$ ) материала о сталь
		в покое/в движении	
1	2	3 а/б	4 а/б
Гравий	1700...1900	45/30	1/0,58
Щебень	1800...2000	45/35	1/0,7
Песок	1400...1700	45/30	1/0,58
Грунт сухой	1200...1300	45/30	1/0,58
Глина сухая	1100...1500	50/35	1,2/0,7
Цемент	1100...1300	43/38	0,93/0,78

Бункера служат для хранения и перегрузки сыпучих и мелкокусковых материалов. Наиболее часто применяются пирамидальные, пирамидально-призматические и цилиндрикоконические бункера.

					МиТОМ.ПТУМЦ.Пр.№4.2022.Отчет			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Выполнил	Крумкач А.А.				Практическая работа №4 «Расчет бункеров, затворов, наклонных лотков»	Лит.	Лист	Листов
Проверил	Астапенко И.В.						1	10
						ГГТУ им. П.О. Сухого гр. МЛ-41		

Минимальные размеры выпускных отверстий бункеров в значительной мере зависят от физических свойств материала и составляют (мм): для сухого песка 150×150, песка сырого 450×450, цемента 225×225, гравия и шлака крупностью до 35 мм 300×300, гравия крупностью до 100 мм 500×500, щебня крупностью до 150 мм 650×650.

Размеры наименьших квадратных и круглых выпускных отверстий бункеров можно определить по формуле

$$a = k(d_{\text{макс}} + 80) \operatorname{tg} p_1^0, \quad (4.2)$$

где  $k = 2,6$  для сортированного материала;  $k = 2,4$  для рядового материала;  $d_{\text{макс}}$  – размер максимальных кусков, мм;  $p_1^0$  – угол естественного откоса материала в покое, град.

Пропускная способность бункера проверяется зависимостью

$$\Pi = 3600Fv, \quad (4.3)$$

где  $F$  – площадь выпускного отверстия,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость истечения материала,  $\text{м/с}$  ( $v \approx 0,5 \dots 2 \text{ м/с}$ ).

Меньшие значения – для рядовых влажных материалов; большие – для сухих сортированных. Углы наклона стенок бункера к горизонту:

$$\alpha = p_1^0 + (5 \dots 10^\circ). \quad (4.4)$$

Углы наклона ребер бункера к горизонту:

$$\alpha' = \varphi + (5 \dots 10^\circ),$$

где  $\varphi$  – угол трения материала о стенки бункера, град.

Наклонные лотки и желоба служат для перемещения насыпных материалов под действием силы тяжести. Для перемещения под уклон пылящих материалов применяют спускные трубы. Размеры сечения желоба зависят от заданной производительности и от крупности кусков материала (табл. 4.2).

Таблица 4.2 - Характеристики крупности материалов

Крупность частиц	Закрытый желоб	Открытый желоб
25	200×150	200×100
40	300×200	300×150
65	400×250	400×200
100	500×300	500×200
250	800×450	800×300
400	1000×600	1000×400

Так, для перемещения кусковых материалов с частицами крупностью до 400 мм применяют открытые и закрытые желоба.

Угол наклона лотков устанавливают в зависимости от угла трения материала о внутреннюю поверхность лотка.

Минимальный угол наклона лотка:

$$\alpha_{\text{мин}} = \varphi + (5 \dots 10^\circ), \text{ град.} \quad (4.5)$$

Затворы служат для регулирования скорости истечения материалов из бункеров, а также для перекрывания их выпускных отверстий. Наиболее рас-

пространены клапанные, секторные, пальцевые и шиберные затворы (рис. 4.1).

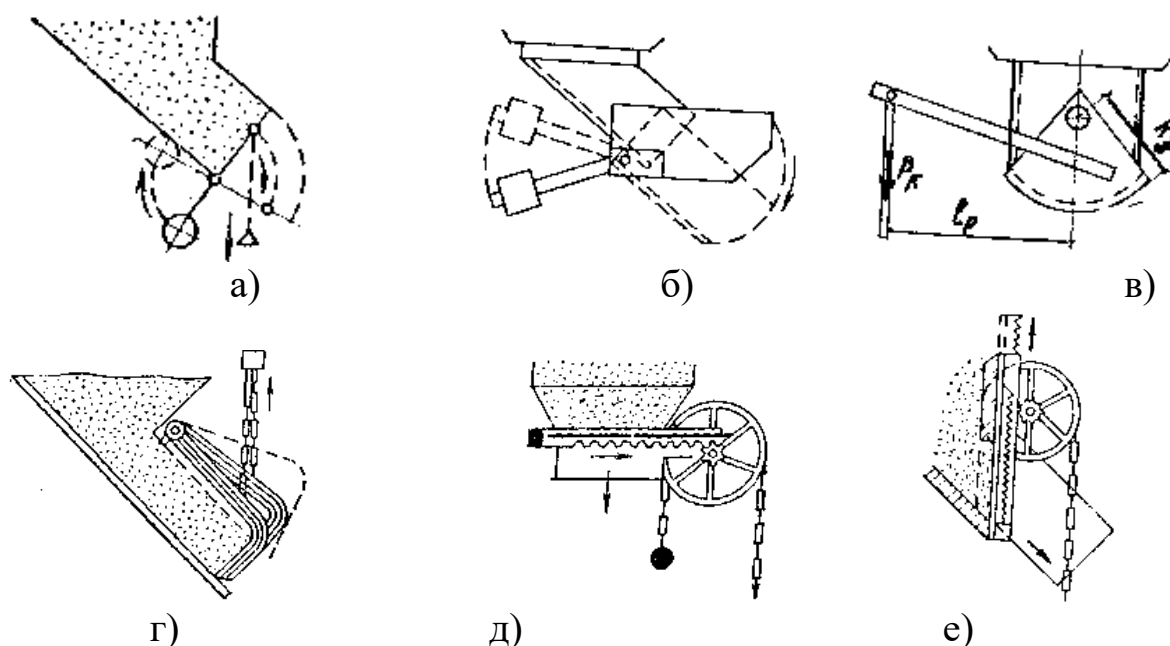


Рис. 4.1. Затворы бункерные: а – клапанный; б – лотковый; в – секторный; г – пальцевый; д – шиберный горизонтальный; е – шиберный вертикальный

Давление материала, действующего на горизонтальный затвор:

$$p = 10\gamma R/\mu k, \text{ Па}, \quad (4.6)$$

где  $\gamma$  – объемная масса материала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $R = F/S$  – гидравлический радиус выпускного отверстия, м;  $F$  – площадь поперечного сечения выпускного отверстия,  $\text{м}^2$ ;  $S$  – периметр выпускного отверстия, м;  $\mu \approx \tan p_1^0$  – коэффициент трения материала о материал;  $p_1^0$  – угол естественного откоса материала в покое;  $k$  – коэффициент подвижности материала:

$$k = (1 - \sin p_1^0)/(1 + \sin p_1^0). \quad (4.7)$$

Усилие  $P_k$ , затрачиваемое на открывание затвора, определяется из равенства:

$$P_k \cdot \ell_p = P \cdot R_3 \cdot \mu_2 + (P + G) \frac{d}{2} \mu_1, \quad (4.8)$$

где  $\ell_p$  – длина рукоятки, м (рис. 2, в);  $P = pa^2$  – нормальная нагрузка на затвор, Н;  $R_3$  – радиус сектора затвора, м;  $\mu_2$  – коэффициент трения материала сектора по материалу в бункере;  $G$  – вес затвора;  $d$  – диаметр оси крепления сектора, м;  $\mu_1$  – коэффициент трения в оси крепления сектора ( $\mu_1 = 0,1 \dots 0,2$ ).

## Задание 1

Определить основные параметры пирамидально-призматического бункера, предназначенного для хранения  $Q = 22$  т несортированного гравия крупностью до  $d_{\text{макс}} = 50$  мм. Размер бункера в плане  $b \times b = 2,5 \times 2,5$  м (рис. 4.2).

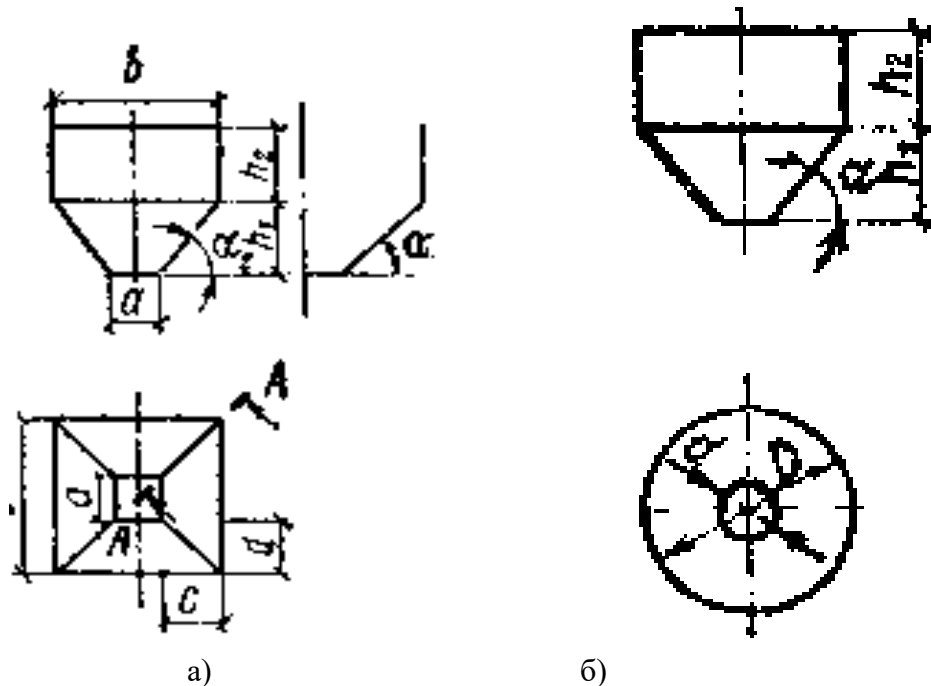


Рис. 4.2. Схемы комбинированных бункеров: а – пирамидально-призматический; б – цилиндрикоконический

## Решение

Определение размеров выпускного отверстия бункера:

$$a = k(d_{\text{макс}} + 80) \operatorname{tg} p_1^0 = 2,4(50 + 80) \cdot \operatorname{tg} 45 = 312 \text{ мм},$$

где  $k = 2,6$  для сортированного материала (нечетные варианты);  $k = 2,4$  для рядового материала (четные варианты);  $d_{\text{макс}} = 50$  мм; угол естественного откоса гравия в покое  $p_1^0 = 45^\circ$  (табл. 4.1, 3а).

Принимаем размеры разгрузочного отверстия  $a \times a = 350 \times 350$  мм. В течение часа через отверстие бункера может быть выгружено:

$$v_1 = 3600 F v = 3600 a^2 v = 3600 \cdot 0,35^2 \cdot 1,5 = 660 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

где ( $v \approx 0,5 \dots 3$  м/с): меньшие значения – для рядовых влажных материалов; большие – для сухих сортированных.

Объем материала в бункере:

$$V_0 = \frac{Q}{\gamma} = \frac{20}{1,6} = 12,5 \text{ м}^3.$$

На разгрузку бункера затрачивается:

$$t = 3600 \frac{V_0}{v_1} = 3600 \frac{12,5}{660} = 68 \text{ с}.$$

Определение основных размеров бункера. Углы наклона стенок (граней) бункера к горизонту  $\alpha^\circ = p_1^0 + 10^\circ = 45^\circ + 10^\circ = 55^\circ$ .

					МиТОМ.ПТУМЦ.Пр.№4.2022.Отчет	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

Высота пирамидальной части бункера:

$$h_1 = \frac{b-a}{2} \operatorname{tg} \alpha = \frac{2,5-0,35}{2} \operatorname{tg} 55^\circ = 1,53 \text{ м.}$$

Высота призматической части бункера может быть найдена из формулы объема бункера:

$$V_n = h_2 b^2 + \frac{h_1}{3} (b^2 + ab + a^2);$$

$$h_2 = \frac{V_n - \frac{h_1}{3} (b^2 + ab + a^2)}{b^2} = \frac{12,5 - \frac{1,53}{3} (2,5^2 + 0,35 \cdot 2,5 + 0,35^2)}{2,5^2} = 1,42 \text{ м.}$$

Полная высота бункера

$$H = h_1 + h_2 = (1,53 + 1,42) = 2,95 \text{ м} = 2950 \text{ мм.}$$

Проверка угла наклона ребра бункера к горизонту. Диагонали оснований пирамидальной части бункера:

$$D = b\sqrt{2} = 2,5 \cdot 1,4 = 3,5 \text{ м; } d = a\sqrt{2} = 0,35 \cdot 1,4 = 0,49 \text{ м.}$$

Угол наклона ребер бункера:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{2h_1}{D-d} = \arctg \frac{2 \cdot 1,53}{3,5 - 0,49} = \arctg 1,02 = 45^\circ.$$

При угле трения гравия по стали (табл.4.1, 4б) в движении  $\varphi = 30^\circ$  получим

$$\alpha_1 \geq \varphi + 5^\circ = 30^\circ + 5^\circ = 35^\circ,$$

т.е. материал во внутренних углах бункера оставаться не будет.

### Задание 1

Определить основные параметры бункера. Данные приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные к расчету бункеров

№ варианта	Q, т	Хранимый материал	b×b, м
1	22	Песок	2×2
2	25	Цемент	3×3
3	20	Гравий (d = 60 мм)	2,5×2,5
4	18	Щебень (d = 50 мм),	2,2×2,2
5	15	Гравий (d = 40 мм)	1,8×1,8
6	16	Песок	1,8×1,8
7	30	Цемент	4×4
8	22	Гравий (d = 50 мм)	2,5×2,5
9	24	Гравий (d = 45 мм)	2,7×2,7
10	10	Гравий (d = 25 мм)	1,5×1,5
11	14	Песок	1,8×1,8
12	26	Цемент	3,4×3,4
13	18	Гравий (d = 45 мм)	1,4×1,4
14	22	Гравий (d = 25 мм)	2,2×2,2
15	16	Гравий (d = 50 мм)	1,7×1,7

Лист

МиТОМ.ПТУМЦ.Пр.№4.2022.Отчет

5

					МиТОМ.ПТУМЦ.Пр.№4.2022.Отчет	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

## Пример 2

Определить основные размеры спускного лотка, подающего гравий на вторичное дробление. Крупность гравия 50...70 мм. Насыпная плотность  $\gamma = 1600 \text{ кг/м}^3$ . Пропускная способность лотка  $\Pi = 160 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Высота спуска  $h = 4 \text{ м}$ . Начальная скорость  $v_0 = 0,2 \text{ м/с}$  (все - табл.4.4). Конечная скорость  $[v_k] \leq 2 \text{ м/с}$ .

### Решение

Выбираем односекционный открытый спусковой лоток (рис. 4.3, а). Коэффициент трения щебня по стали в движении  $\mu = 0,58$ ;  $\varphi = 30^\circ$  (табл.4.1, 4б). Угол наклона желоба  $\alpha = \varphi + (5 \dots 10^\circ) = 30^\circ + 5^\circ = 35^\circ$ .

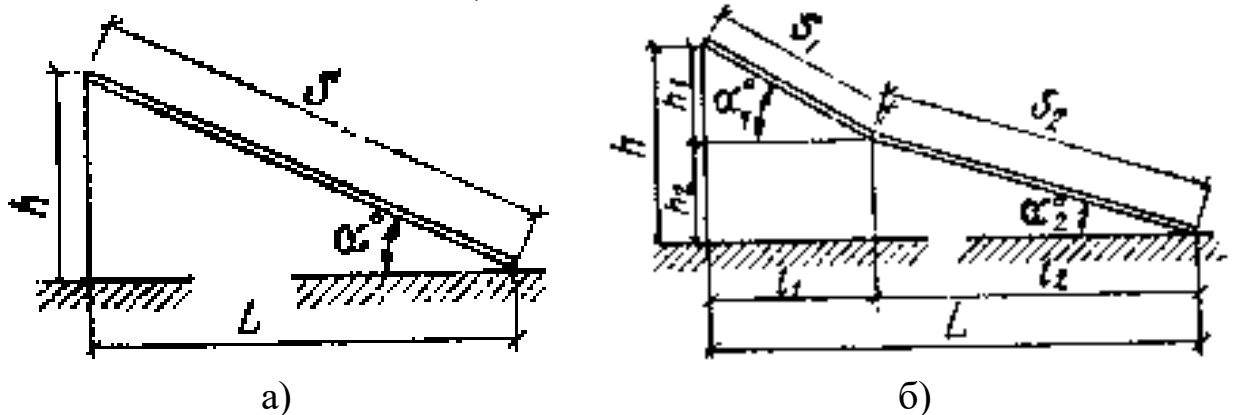


Рис. 4.3 - Схема расчета лотка: а – одинарного; б – составного

Конечная скорость определяется по формуле

$$v_k = \sqrt{2 \cdot g \left( 1 - \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha} \right) h + v_0^2} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \left( 1 - \frac{0,58}{\operatorname{tg} 35^\circ} \right) 4 + 0,2^2} = 3,8 \text{ м/с}.$$

Скорость  $v_k = 3,8 \text{ м/с}$  оказывается выше допустимой  $[v_k] = 2 \text{ м/с}$ . Поэтому необходимо перейти на составной лоток (рис. 4.3, б).

Длина составного спускного лотка при  $v_0 = 0,2 \text{ м/с}$  и  $[v_k] = 2 \text{ м/с}$  определяется как:

$$L = \frac{2gh + v_0^2 - v_k^2}{2g\mu} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 4 + 0,2^2 - 2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,58} = 6,7 \text{ м}.$$

Высота  $h_1$  начального участка спуска при  $v_0 = 0,2 \text{ м/с}$  и  $[v_k] = 2 \text{ м/с}$  определяется

$$h_1 = \frac{(v_k^2 - v_0^2) \operatorname{tg} \alpha}{2g(\operatorname{tg} \alpha - \mu)} = \frac{(2^2 - 0,2^2) \cdot \operatorname{tg} 35^\circ}{2 \cdot 9,81(\operatorname{tg} 35^\circ - 0,58)} = 1,16 \text{ м}.$$

Высота  $h_2$  конечного участка спуска будет определяться как

$$h_2 = h - h_1 = 4 - 1,16 = 2,84 \text{ м}.$$

Угол наклона конечного тормозящего участка:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{h_2}{L - \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}} = \frac{2,84}{6,7 - \frac{1,16}{0,7}} = 0,558 \quad \alpha_2 = 29^\circ$$

**Конечная скорость** на тормозящем участке, для которого  $v_0 = 0,2$  м/с;  $h_2 = 2,84$  м и  $\alpha_2 = 29^\circ$  определяется по формуле

$$v_k = \sqrt{2g \left(1 - \frac{\mu}{\operatorname{tg} \alpha_2}\right) h_2 + v_0^2} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \left(1 - \frac{0,58}{\operatorname{tg} 29^\circ}\right) \cdot 2,84 + 2^2} = 1,3 \text{ м/с.}$$

Полученная скорость не превышает допустимую конечную скорость.

По заданной производительности (таблица 4.4) определяем площадь поперечного сечения лотка:

$$F = \frac{\Pi}{3,6 \times v_k \times K} = \frac{160}{3600 \times 1,3 \times 0,35} = 0,098 \text{ м}^2,$$

где  $\Pi$  – пропускная способность лотка, т/ч;  $v$  – конечная скорость на лотке, м/с;  $K$  – коэффициент заполнения,  $K=0,35$ .

Ширина желоба  $b = a + 0,05 = 0,35 + 0,05 = 0,4$  м; высота бортов желоба  $c = F/b = 0,098/0,4 = 0,245$  м. Площадь поперечного сечения желоба

## Задание 2

Определить основные размеры спускного лотка.

Таблица 4.4 – Исходные данные к расчету лотков

№ варианта	Максимальная крупность камня $a$ , мм	Объемная масса $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Пропускная способность лотка $\Pi$ , м <sup>3</sup> /ч	Высота спуска $h$ , м	Начальная скорость $v_0$ , м/ч	Конечная скорость $v$ , м/ч	Примечание
1	30	2	400	6	0,6	2,5	Щебень
2	50	1,9	300	5	0,5	2,5	Гравий
3	45	1,8	200	4	0,5	2	Гравий
4	40	1,8	150	3	0,3	2	Щебень
5	20	1,7	100	2	0,2	1,5	Песок
6	70	1,9	350	3	0,1	3	Гравий
7	90	2	250	4	0,3	2,5	Гравий
8	30	1,6	450	2	0,15	2	Песок
9	20	1,8	150	4	0,5	2	Щебень
10	70	1,4	120	5	0,6	1,5	Щебень
11	15	1,6	320	3	0,2	3	Гравий
12	55	2,2	240	4	0,35	2,5	Гравий
13	60	1,5	180	2	0,25	2	Песок
14	20	1,6	140	4	0,6	2	Щебень
15	40	1,8	220	5	0,4	1,5	Щебень



### Пример 3

Рассчитать секторный затвор, перекрывающий бункер песка. Радиус затвора  $R_3 = 0,4$  м, длина рукоятки  $l_p = 0,7$  м, размер выпускного отверстия бункера  $a \times a = 0,35 \times 0,35$  м (рис. 4.1, в).

#### Решение

Площадь поперечного сечения выпускного отверстия  $F = a \cdot a = 0,35^2 = 0,123 \text{ м}^2$ .

Периметр выпускного отверстия  $S = 4a = 4 \cdot 0,35 = 1,4$  м.

Гидравлический радиус выпускного отверстия определяется как

$$R = \frac{F}{S} = \frac{0,123}{1,4} = 0,09 \text{ м.}$$

Угол естественного откоса песка в покое  $\rho_1^0 = 45^\circ$  (табл.4.1, 3а).

Коэффициент подвижности материала определяется как

$$k = \frac{1 - \sin \rho_1^0}{1 + \sin \rho_1^0} = \frac{1 - \sin 45^\circ}{1 + \sin 45^\circ} = 0,176$$

Коэффициент трения песка о материал затвора  $\mu = 1$  (табл.4.1, 4а). Давление материала, действующее на горизонтальный затвор, определяется по формуле 4.6  $p = 10\gamma R/\mu k$ :

$$p = 10 \cdot \frac{1800 \cdot 0,09}{1 \cdot 0,176} = 9100 \text{ Па.}$$

Нормальная нагрузка на затвор  $P = p \cdot a^2 = 9100 \cdot 0,35^2 = 1120$  Н. Вес затвора принимаем равным  $G = 100$  Н, диаметр оси  $d = 15$  мм  $= 0,015$  м. Усилие, затрачиваемое на открывание затвора:

$$P_k = \frac{PR_3\mu_2 + (P + G)\frac{d}{2}\mu_1}{l_p} = \frac{1120 \cdot 0,4 \cdot 1 + (1120 + 100)\frac{0,015}{2} \cdot 0,2}{0,7} = 650 \text{ Н.}$$

### Задание 3

Рассчитать секторный затвор по параметрам, приведенным в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Исходные данные к расчету затворов

№ варианта	$R_3$ , м	$l_p$ , м	$a \times a$ , м	Хранимый материал
1	0,35	0,5	$0,25 \times 0,25$	Песок
2	0,4	0,6	$0,3 \times 0,3$	Цемент
3	0,45	0,7	$0,35 \times 0,35$	Шлак
4	0,5	0,75	$0,4 \times 0,4$	Гравий ( $d_{\text{маск}} = 30$ мм)
5	0,6	0,8	$0,45 \times 0,45$	Щебень ( $d_{\text{маск}} = 40$ мм)
6	0,25	0,45	$0,2 \times 0,2$	Песок
7	0,5	0,8	$0,4 \times 0,4$	Песок
8	0,4	0,6	$0,35 \times 0,35$	Шлак
9	0,7	0,95	$0,5 \times 0,5$	Щебень ( $d_{\text{маск}} = 50$ мм)
10	0,3	0,5	$0,3 \times 0,3$	Шлак

#### **4.4 Выполнение работы**

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями.
2. Изучить устройств и принцип работы бункеров, затворов и лотков.
3. Произвести расчет бункеров, затворов и лотков.
4. Оформить отчет.

#### **4.5 Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Теоретические сведения.
3. Расчет бункеров, затворов и лотков.
4. Выводы по работе.

					МиТОМ.ПТУМЦ.Пр.№4.2022.Отчет	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		