ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
(ЦНИИПРОМЗДАНИЙ) ГОССТРОЯ СССР

РУКОВОДСТВО

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ

МОСКВА 1978

gost.e-ecolog.ru

ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
И ПРОЕКТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ
(ЦНИИПРОМЗДАНИЙ) ГОССТРОЯ СССР

РУКОВОДСТВО
ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ

МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1978

УДК 624.953:621.642.3.04

Рекомендовано к изданию решением секции несущих конструкций НТС ЦНИИпромзданий.

Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров. М., Стройиздат, 1978. 29 с. (Центр. науч.-исслед. и проектно-эксперим. ин-т пром. зданий и сооружений Госстроя СССР ЦНИИпромзданий).

Разработано инж. Ю. Ф. Лифшицем.

Руководство содержит методику определения сдвиговых характеристик сыпучих материалов, заполняющих бункера, а также методику определения с помощью этих характеристик геометрических параметров бункеров, обеспечивающих надежное истечение сыпучего материала при условии изменчивости характеристик материала заполнения.

Предназначено для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования бункеров.

Р $\frac{30213-358}{047(01)-78}$ Инструкт.-нормат., II вып. — 74—77

© Стройиздат, 1978

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее Руководство разработано в развитие главы СНиП по проектированию сооружений промышленных предприятий.

Руководство предназначено для определения геометрических параметров бункеров по условию надежного истечения сыпучего материала. Под геометрическими параметрами подразумеваются форма и размеры выпускного отверстия бункера, а также углы наклона его стенок, так как правильный выбор этих параметров может гарантировать истечение сыпучего материала без сводообразований и зависаний. В настоящее время во многих случаях геометрические параметры бункеров в основном выбираются по опыту и аналогии со сходными условиями или исходя из заранее заданных габаритов зданий. Условия надежного истечения, которые следуют из объективных характеристик конкретного сыпучего материала, его изменчивости, склонности к слеживанию, не находят отражения в проектах бункеров, в результате чего нередки случаи, когда построенные бункера, особенно для связных материалов, с самого начала оказываются неработоспособными и нуждаются в реконструкции.

Размеры выпускных отверстий и углы наклона стенок бункера определяются путем специального расчета в зависимости от необходимых для этого физико-механических характеристик материала заполнения.

Руководство состоит из двух частей. В первой части приводится методика определения физико-механических характеристик материала заполнения, необходимых для выполнения расчета, во второй — методика расчета. Дается пример расчета.

Физико-механические характеристики материала заполнения, определяемые другими способами, не могут быть использованы в рекомендуемом методе расчета.

Руководство носит межотраслевой характер.

Настоящее Руководство разработано на основании обобщения советского и зарубежного опыта определения геометрических параметров бункеров для связных и несвязных материалов, а также исследований ЦНИИпромзданий по определению физико-механических характеристик сыпучих материалов с крупными частицами (более 3 мм) и по определению характера изменчивости свойств материалов при переменной влажности.

Замечания и предложения по содержанию настоящего Руководства просим направлять по адресу: 127238, Москва, И-238, Дмитровское шоссе, 46.

1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ

СДВИГОВЫЙ ПРИБОР

1.1. Физико-механические характеристики материала заполнения рекомендуется определять путем испытания материала на сдвиговом приборе. В принципе испытания на сдвиг материала заполнения аналогичны испытаниям грунтов на сдвиг, но стандартные приборы для испытания грунтов непригодны для материала заполнения, так как они предназначены для уплотняющих нагрузок более 1 кгс/см², а материал заполнения следует испытывать при уплотняющих нагрузках не более 1 кгс/см², присущих этому материалу при его истечении из бункеров. Кроме того, методика определения характеристик материала заполнения имеет ряд особенностей, вызывающих необходимость в специальной конструкции сдвигового прибора.

1.2. Сдвиговый прибор должен состоять из следующих основных узлов: срезывателя, динамометра, привода. Сдвиг должен осуществляться путем принудительного перемещения подвижной обоймы срезывателя относительно неподвижной с постоянной скоростью и непрерывно фиксируемым сопротивлением сдвигу.

1.3. Схема устройства сдвигового прибора представлена на рис. 1. Срезыватель состоит из двух цилиндрических обойм одинакового диаметра: нижней неподвижной *1* и верхней подвижной *3*. Неподвижная обойма имеет днище, с которым она соединена наглухо. Срезыватель в целом является съемным и закрепляется на станине *13* винтами *16*. Испытуемый сыпучий материал засыпается в срезыватель так, чтобы он заполнял обе обоймы на полную высоту.

Уплотняющая нагрузка передается на материал при помощи нагружающей системы, состоящей из жесткого штампа *4*, двух траверс *5* и набора гирь *15*. Поверхность штампа, обращенная к испытуемому материалу, должна быть рифленой, как и поверхность днища нижней обоймы. Перемещение подвижной обоймы осуществляется при помощи привода. Он состоит из реверсивного электродвигателя *11* марки РД-09, имеющего редукцию $^1/_{870}$, и винтовой пары *12* с шагом 1 мм. Скорость перемещения равна 2 мм/мин.

Величина сдвигового усилия фиксируется динамометром. Он состоит из обоймы *10*, упругой пластины *8* и индикатора *9* часового типа с ценой деления 0,001 мм. Динамометр размещен между приводом и срезывателем и поддерживается двумя направляющими *14*. Вращение винта привода создает поступательное движение динамометра, который скользит по направляющим и смещает верхнюю обойму. Сдвиговое усилие передается непосредственно не на обойму, а на кронштейн *6*, который жестко связан со штампом. Когда включается электродвигатель, динамометр начинает давить на кронштейн. Это давление передается одновременно на верхнюю обойму через штырь *7*, который входит в соприкосновение с обоймой, и на штамп. Длина штыря подобрана таким образом, чтобы штамп не касался стенок обоймы. Благодаря наличию кронштейна и подобранной длине штыря сдвигающая нагрузка более равномерно передается на сыпучий материал, так как в сдвиге активно участвует не только сама обойма, но и рифленый штамп. Направление сдвигающей силы должно совпадать с плоскостью сдвига.

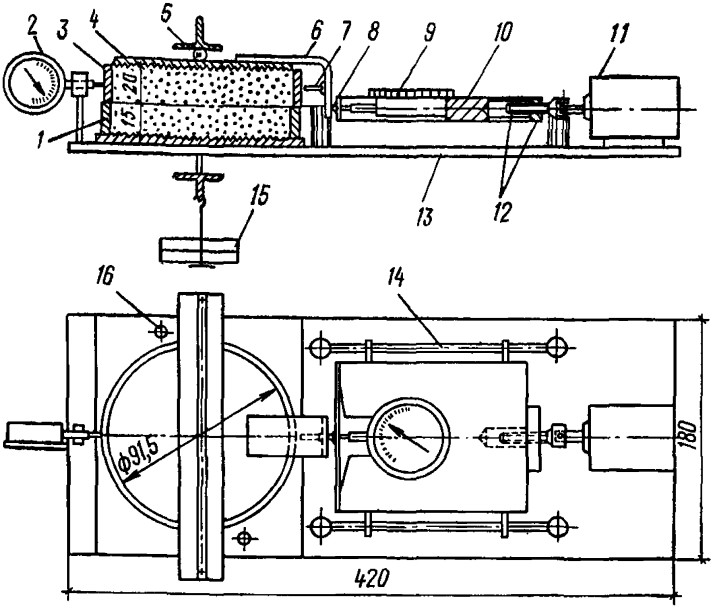


Рис. 1. Схема устройства сдвигового прибора

1 — неподвижная обойма; *2* — индикатор деформации; *3* — подвижная обойма; *4* — штамп; *5* — траверса; *6* — кронштейн; *7* — штырь; *8* — упругая пластина; *9* — индикатор сдвигового усилия; *10* — обойма динамометра; *11* — электродвигатель; *12* — винтовая пара; *13* — станина; *14* — направляющие; *15* — гири; *16* — винт крепления нижней обоймы

Деформация сдвига определяется по индикатору *2* часового типа с ценой деления 0,01 мм, а усилие сдвига определяется по показаниям индикатора динамометра, для чего динамометр предварительно тарируется.

1.4. Конструктивные решения прибора могут иметь различные варианты. При этом скорость сдвига должна приниматься в пределах 1—2 мм/мин. Отношение высоты срезывателя к диаметру должно быть равно примерно $^1/_3$. Диаметр срезывателя около 100 мм. Сдвиговое усилие должно передаваться одновременно и на обойму, и на штамп. Сопротивление сдвигу должно фиксироваться непрерывно в течение всего процесса сдвига. Помимо визуального возможно автоматическое фиксирование усилия сдвига при помощи тензодинамометров. Визуальное фиксирование по индикатору с ценой деления 0,001 мм обеспечивает простоту исполнения установки и требуемую точность при проведении экспериментов.

1.5. На сдвиговом приборе с обоймами диаметром 100 мм допускается испытывать материалы с частицами крупностью до 3 мм.

ПОСТРОЕНИЕ ЛИНИИ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ

1.6. Для испытания отбирается представительная проба натурного сыпучего материала. Условия ее представительности, т. е. минимальный размер пробы и порядок ее отбора, должны определяться

в соответствии с ГОСТ 17495—72 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Методы отбора и подготовки проб для определения гранулометрического состава и механической прочности».

Если проба содержит частицы крупнее 3 мм, то из нее должна быть выделена мелкая фракция с максимальным размером частиц 3 мм или менее 3 мм, с которой и проводятся испытания на сдвиг. Эта фракция получается просеиванием пробы через сито с ячейками размером не более 3 мм. При этом должно быть определено процентное содержание мелкой фракции по отношению к весу всей пробы, которое используется в дальнейших расчетах геометрических параметров бункера.

Для испытания по данной методике требуется не менее 15 кг материала мелкой фракции. Принимая во внимание конкретное процентное содержание мелкой фракции в пробе натурного материала, размер пробы необходимо рассчитать таким образом, чтобы она отвечала условиям ГОСТ 17495—72 и из нее можно было получить *необходимое для испытаний количество мелкой фракции.*

Влажность испытуемого материала должна сохраняться постоянной в течение всего времени испытания. Это достигается консервацией материала в герметичном сосуде, например эксикаторе.

1.7. Непосредственная цель испытания сыпучего материала на сдвиговом приборе заключается в построении диаграмм предельных касательных напряжений, представляющих собой зависимость касательных напряжений в предельном состоянии от нормальных напряжений. Другое название этих диаграмм — линии предела текучести, или линии ПТ. Построение одной линии ПТ требует проведения испытаний нескольких образцов в определенной последовательности по регламентированной методике.

1.8. Испытание каждого образца на сдвиг (рис. 2) должно состоять из трех стадий. На I и II стадиях производится подготовка образца — его уплотнение, на III стадии — собственно сдвиг.

1.9. Первая стадия должна состоять из следующих операций. Нижняя обойма срезывателя без сыпучего материала закрепляется на станине прибора. Верхняя обойма должна быть смещена относительно нижней на 2—4 мм в сторону динамометра (см. рис. 2, *а*). На верхнюю обойму устанавливается сверху дополнительная обойма. На этом подготовка срезывателя к укладке образца заканчивается, и срезыватель заполняется сыпучим материалом. Материал разравнивается, и на его поверхность ставится специальный гладкий штамп. На штамп устанавливается траверса с гирями. Под действием веса гирь материал в срезывателе уплотняется. Для большей равномерности уплотнения штампу следует сообщить несколько (до 10) возвратно-вращательных движений в горизонтальной плоскости с отклонением от среднего положения на 10°. Кроме того, для ликвидации сцепления верхней подвижной обоймы с сыпучим материалом обойма прокручивается вручную также возвратно-вращательными движениями относительно сыпучего материала. После прокручивания штампа и обоймы траверса с гирями временно снимается, а лишний материал выше уровня подвижной обоймы удаляется вместе с дополнительной обоймой и гладким штампом. На этом I стадия заканчивается. Ее цель — *уплотнение материала под действием вертикальной нагрузки.*

1.10. Вес гирь для уплотнения образца на I стадии равен заранее выбранной уплотняющей нагрузке P за вычетом веса штампа, траверсы, верхней обоймы и веса сыпучего материала в верхней

обойме срезывателя. Выбор величины P для отдельной линии ПТ должен производиться в соответствии с п. 1.17.

1.11. На II стадии материал должен уплотняться горизонтальной сдвигающей нагрузкой. С этой целью устанавливается следующая последовательность операций. На выровненную поверхность сыпучего материала ставится рабочий штамп и прикладывается та же вертикальная нагрузка P, которая действовала на I стадии уплотнения (см. рис. 2, *а*), а затем — сдвигающая нагрузка. Она создает-

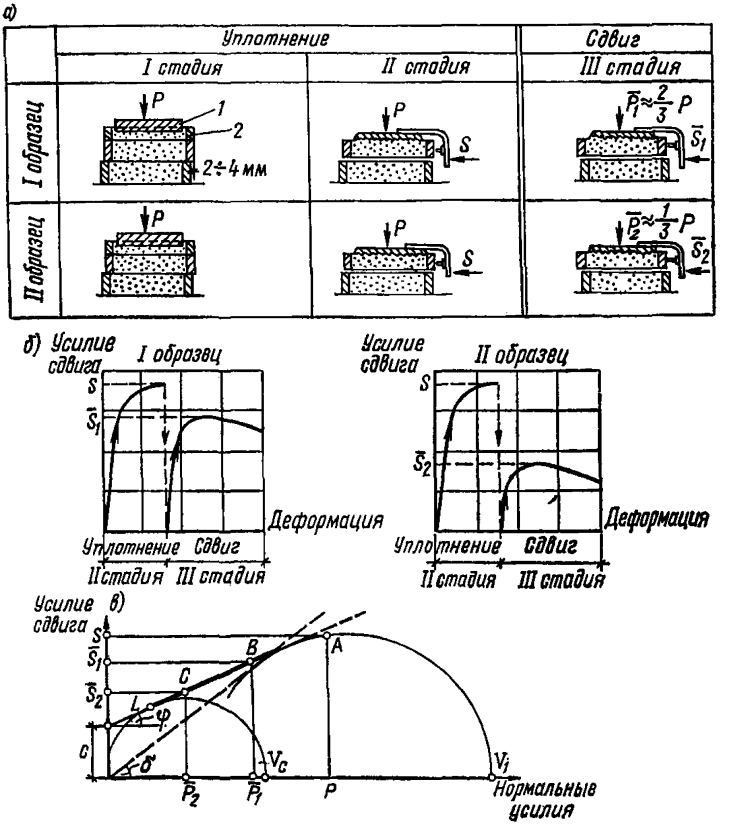


Рис. 2. Испытание сыпучего материала на сдвиг и его результат

а — схема стадий испытания образцов: *1* — гладкий штамп; *2* — дополнительная обойма; *б* — усилия сдвига образцов; *в* — схема определения линии ПТ

ся за счет работы привода. Для этого включают привод и начинают наблюдать по индикатору динамометра за ростом сопротивления сдвигу. Когда рост сопротивления сдвигу прекратится (см. рис. 2, *б*), привод останавливается и уплотнение образца на этом заканчивается. Величина установившегося сопротивления сдвигу S (см. рис. 2, *б*) вместе с величиной уплотняющей вертикальной нагрузки P (см.

рис. 2, *а*) служат ординатой и абсциссой первой точки *А* линии ПТ (см. рис. 2, *в*).

После остановки привода вертикальная нагрузка *Р* снимается и подготовка образца к испытанию на сдвиг на этом заканчивается.

1.12. Как при уплотнении горизонтальной сдвигающей нагрузкой (II стадия), так и при испытании на сдвиг (III стадия) необходимо следить, чтобы между подвижной и неподвижной обоймами оставался небольшой (менее 1 мм) кольцевой зазор. Для его создания специальных прокладок между обоймами не требуется, так как верхняя обойма удерживается в нужном положении за счет сил трения о сыпучий материал.

Наличие зазора служит гарантией того, что вертикальная уплотняющая нагрузка в плоскости среза передается только на сыпучий материал и не передается на нижнюю обойму.

1.13. Испытание на сдвиг (III стадия) производится при меньшей вертикальной нагрузке, чем вертикальная нагрузка *Р* на стадиях уплотнения. Для первого испытания на сдвиг рекомендуется принимать вертикальную нагрузку при срезе $\overline{P_1}$ в размере $^2/_3$ вертикальной нагрузки при уплотнении *Р*. Вес гирь при срезе подбирается таким образом, чтобы вместе с весом траверсы, штампа, верхней обоймы и материала внутри верхней обоймы он был равен $\overline{P_1}$. Образцу передается нагрузка $\overline{P_1}$, включается привод прибора и осуществляется полный срез образца. Получившееся усилие среза $\overline{S_1}$ вместе с вертикальной нагрузкой при срезе $\overline{P_1}$ образуют ординату и абсциссу второй точки *В* линии ПТ (см. рис. 2, *в*).

1.14. Для построения одной линии ПТ требуется испытать не менее двух образцов. Подготовка второго образца, т. е. уплотнение на I и II стадиях, производится точно так же и при той же вертикальной уплотняющей нагрузке *Р*, как и подготовка первого образца (см. рис. 2, *а*). Различие заключается в срезе, который производится у второго образца при другой вертикальной нагрузке $\overline{P_2} \simeq {}^1/_3 P$. Полученное здесь усилие среза $\overline{S_2}$ вместе с нагрузкой $\overline{P_2}$ образуют ординату и абсциссу третьей точки *С* линии ПТ (см. рис. 2, *в*).

1.15. По точкам *А, В, С* строится линия ПТ. Через точки *В* и *С* проводится прямая линия (рис. 2, *в*). Затем проводятся два круга Мора с таким расчетом, чтобы они касались этой прямой, а центры их находились на оси абсцисс. Малый круг проводится через начало координат, а большой — через точку *А*. Точка касания большого круга Мора должна лежать правее точки *В*, а точка касания малого круга — левее точки *С*. Если это условие, служащее контролем правильности проведенного испытания, не выполняется, то испытания на сдвиг должны быть сделаны заново. Причинами неудачных экспериментов могут быть неоднородность образца или неправильное его уплотнение.

Линией ПТ является отрезок проведенной через точки *В* и *С* прямой линии, заключенный между точками касания кругов Мора.

Круги Мора могут либо приближенно проводиться непосредственно на чертеже циркулем путем подбора положения центров, либо необходимые параметры этих кругов могут определяться аналитически.

Каждая линия ПТ соотвстствует определенному уплотняющему давлению *Р*. Например, если линия ПТ получена при уплотняющем давлении 10 кгс, то она маркируется ПТ-10.

1.16. Для построения одной линии ПТ требуется испытать не менее двух образцов. В действительности из-за возможного разброса результатов испытаний на сдвиг необходимы повторные испытания. Число образцов для получения одной линии ПТ возрастает до 4—6 Величины сдвиговых усилий повторных опытов усредняются.

Увеличение числа повторных опытов (более 2—3) нецелесообразно по следующей причине. Общее число опытов с каждой пробой велико, и сокращение времени всего цикла испытаний приобретает принципиально важное значение, так как имеется опасность изменения свойств материала в течение времени испытаний даже в условиях консервации пробы.

1.17. Объем испытаний на сдвиг сыпучего материала при его определенной влажности должен быть таким, чтобы получить не менее 3—5 линий ПТ при различных уплотняющих давлениях P. Вначале испытания проводятся со значениями $P=1$—3 кгс, а затем значение P увеличивается до 20—30 кгс.

Получение ряда линий ПТ необходимо, чтобы иметь характеристики сыпучего материала как функции уплотняющего давления для последующего расчета геометрических параметров бункера.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СДВИГОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

1.18. Каждая линия ПТ (см. рис. 2, *в*) позволяет определить значения следующих характеристик сыпучего материала: угла внутреннего трения φ (определяется как угол наклона линии ПТ к оси абсцисс; удельного сцепления c (определяется как отрезок оси ординат от начала координат до точки пересечения с этой осью продолжения линии ПТ); предельного напряжения сыпучего материала на поверхности свода V_c (определяется как диаметр малого круга Мора); эффективного угла трения δ (определяется как угол наклона к оси абсцисс касательной, проведенной из начала координат, к большому кругу Мора). Функциональная зависимость предельного напряжения сыпучего материала на поверхности свода V_c от главного уплотняющего давления V_1 носит название функции истечения. Главное уплотняющее давление определяется как отрезок оси абсцисс от начала координат до наиболее удаленной точки пересечения большого круга Мора с этой осью.

1.19. Числовое значение характеристик можно определять либо путем непосредственных замеров по чертежам линий ПТ (см. рис. 2,*в*), либо аналитически по числовым результатам испытаний на сдвиг. В последнем случае вычисления проводятся по следующим формулам:

угол внутреннего трения φ

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\bar{S}_1-\bar{S}_2}{\bar{P}_1-\bar{P}_2}; \qquad (1)$$

удельное сцепление c

$$c=\frac{\bar{P}_1\bar{S}_2-\bar{P}_2\bar{S}_1}{\bar{P}_1-\bar{P}_2}, \qquad (2)$$

где $\bar{P}_1$, $\bar{P}_2$, $\bar{S}_1$, $\bar{S}_2$ — опытные данные (по пп. 1.13 и 1.14);

предельное напряжение сыпучего материала на поверхности свода V_c (ордината функции истечения)

$$V_c = 2c\ (\operatorname{tg}\varphi + \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi}); \qquad (3)$$

главное уплотняющее давление V_1 (абсцисса функции истечения)

$$V_1 = \frac{c + P\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi} - \sqrt{(c + \operatorname{tg}\varphi\, P)^2 - S^2}}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi} - \operatorname{tg}\varphi}, \qquad (4)$$

где φ — угол внутреннего трения — формула (1);
c — удельное сцепление — формула (2);
P, S — опытные данные (см. п. 1.11);
эффективный угол трения δ

$$\sin\delta = \frac{V_1 \operatorname{tg}\varphi + c}{V_1\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi} - c}. \qquad (5)$$

1.20. Кроме угла внутреннего трения, функции истечения и эффективного угла трения, значения которых определяются при испытаниях на сдвиговом приборе (см. рис. 1), необходимо определить углы внешнего трения (трение сыпучего материала по материалу стенки бункера) и объемный вес сыпучего материала.

1.21. Для определения углов внешнего трения используется тот же сдвиговый прибор, но вместо неподвижной обоймы устанавливается образец материала стенки бункера, например лист стали или бетонная пластина (рис. 3). Испытания по определению углов внешнего трения проводятся следующим образом. Подвижная обойма, установленная непосредственно на пластину испытуемого материала стенки бункера, заполняется сыпучим материалом. На материал кладется жесткий штамп, прикладывается вертикальная нагрузка P_1.

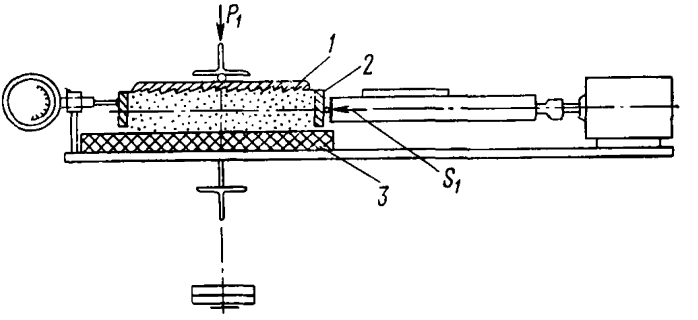


Рис. 3. Схема устройства сдвигового прибора для определения угла внешнего трения

1 — штамп; *2* — обойма; *3* — образец материала стенки бункера

Затем включается привод прибора и производится срез. Величина усилия среза S_1 определяется по динамометру. Испытание повторяется не менее 3 раз при различных вертикальных нагрузках P_2, P_3 и т. д. Зависимость усилия среза S от вертикальной (уплотняющей) нагрузки носит название линии предела текучести у стенки (линия ПТС).

1.22. Объемный вес сыпучего материала определяется взвешиванием определенного объема сыпучего материала. Для этого используется сосуд круглой или квадратной формы с отношением высоты к диаметру или стороне квадрата 1 : 3 и отношением размера наибольшей частицы материала к диаметру или стороне сосуда не более 1 : 7. Исследуемый материал натурной крупности засыпается в сосуд и уплотняется вертикальным давлением. Зная объем и вес уплотненного материала, определяют его объемный вес. Определение объемного веса производится несколько раз при различных уплотняющих давлениях.

1.23. Для последующего расчета геометрических параметров бункера вводятся основные физико-механические характеристики: функция истечения, угол внутреннего трения, эффективный угол трения, а также угол внешнего трения и объемный вес — должны быть представлены в виде зависимостей от главного уплотняющего давления. Величины эффективного угла трения и угла внутреннего трения малочувствительны к изменению уплотняющего давления (их графики обычно имеют вид слегка наклонных прямых линий), поэтому для расчета параметров бункеров не требуется большой точности в определении этих характеристик. В противоположность этому точность в определении функции истечения оказывает существенное влияние на результаты расчета. График функции истечения следует аппроксимировать степенной функцией

$$V_c = a V_1^{\frac{1}{b}}, \qquad (6)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты.

Каждая точка функции истечения с парой координат (V_1, V_c) получается из одной линии ПТ. Имея несколько линий ПТ и, следовательно, несколько пар координат экспериментальных точек, подбирают параметры a и b ($b>1$) по методу наименьших квадратов. Величины V_1 и V_c выражаются здесь в единицах силы (кгс).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ С УЧЕТОМ ФАКТОРА СЛЕЖИВАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА

1.24. Физико-механические характеристики с учетом фактора слеживаемости должны определяться в том случае, когда требуется проверить, меняет ли характеристики и в каких пределах сыпучий материал, если будет находиться в бункере то или иное время без движения. Изменение характеристик при этих условиях является признаком слеживаемости материала.

1.25. Характеристики с учетом той или иной длительности слеживания (временны́е характеристики) определяются после проведения мгновенных (т. е. без учета длительности слеживания) испытаний на сдвиг на сдвиговом приборе (см. рис. 1). Отличие в методике временны́х испытаний от методики мгновенных заключается в том, что каждый образец испытывается не в три, а в четыре стадии (рис. 4, *а*); I и II стадии временны́х испытаний ничем не отличаются от соответствующих стадий мгновенных испытаний (см. пп. 1.9—1.11).

1.26. При временны́х испытаниях добавляется III стадия уплот-

нения образца. Она заключается в том, что после первых двух стадий срезыватель вместе с образцом снимается со сдвигового прибора и ставится на длительное уплотнение. С этой целью на образец устанавливается вертикальная нагрузка. Величина ее равна главному уплотняющему давлению V_1, которое действовало при мгновенных испытаниях. Величина V_1 определяется после проведения мгновенных испытаний и построения линии ПТ (см. рис. 4, *б*). В нагруженном состоянии образец выдерживается определенное время в зависимости от того, какой срок слеживания требуется проверить. При этом должны быть приняты меры по консервации нагруженного образца во избежание изменения его влажности.

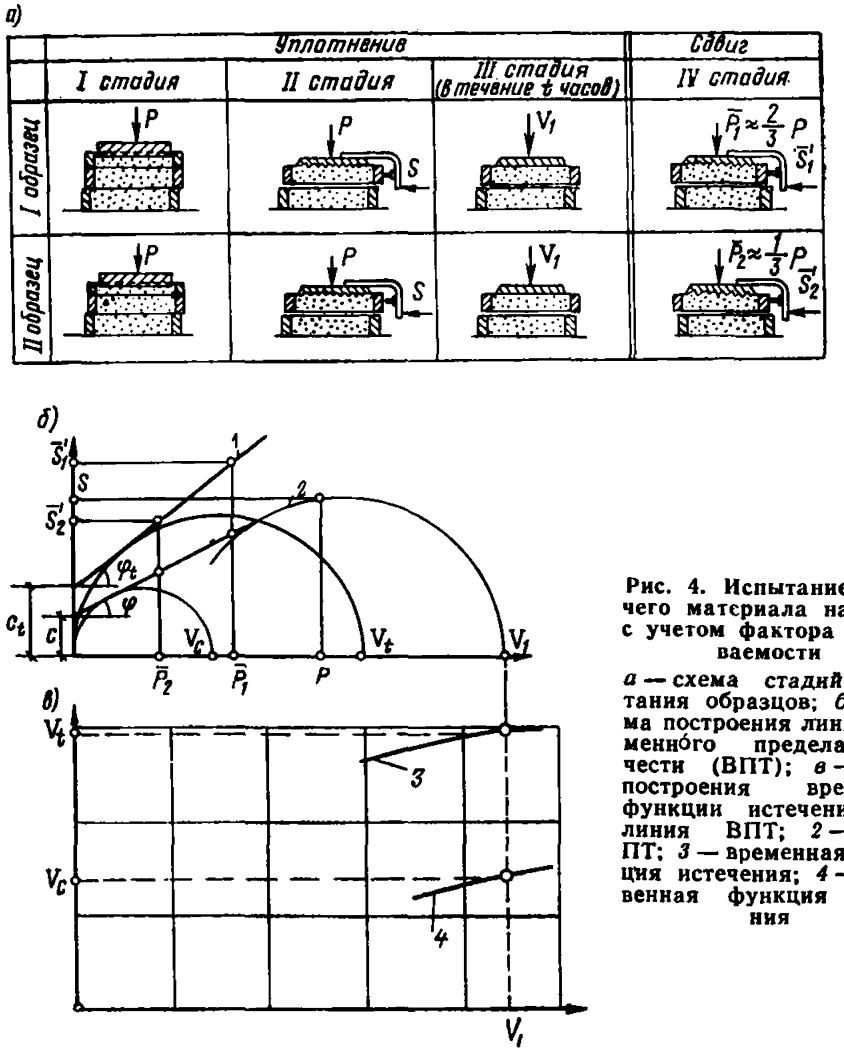


Рис. 4. Испытание сыпучего материала на сдвиг с учетом фактора слеживаемости

а — схема стадий испытания образцов; *б* — схема построения линии временно́го предела текучести (ВПТ); *в* — схема построения временной функции истечения: *1* — линия ВПТ; *2* — линия ПТ; *3* — временная функция истечения; *4* — мгновенная функция истечения

1.27. По истечении заданного времени уплотняющая нагрузка снимается, и срезыватель вместе с образцом вновь устанавливается на сдвиговый прибор для проведения последней, IV стадии испытания. Эта стадия ничем не отличается от III стадии мгновенных испытаний (см. п. 1.13). Сдвиг производится при тех же вертикальных

нагрузках, которые были приняты для линии ПТ во время мгновенных испытаний (см. рис. 4, *б*).

1.28. В результате временны́х испытаний не менее двух образцов получают новую линию ПТ, которая носит название линии временно́го предела текучести, или линии ВПТ (см. рис. 4, *б*). Абсциссами точек линии ВПТ служат вертикальные нагрузки $\overline{P_1}$ и $\overline{P_2}$, которые были приняты как абсциссы точек линии ПТ, а ординатами — усилия среза $\overline{S_1'}$ и $\overline{S_2'}$, полученные при временны́х испытаниях.

1.29. Числовые значения временны́х характеристик угла внутреннего трения φ_t, удельного сцепления c_t и ординаты функции истечения определяются по линии ВПТ так же, как по линии ПТ для мгновенных характеристик (см. п. 1.19). Абсцисса точки временно́й функции истечения остается той же, что и для мгновенной функции истечения, а ординатой служит диаметр круга Мора, проведенного через начало координат касательно линии ВПТ (см. рис. 4, *в*). По нескольким линиям ВПТ строится временна́я функция истечения.

2. РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ В СООТВЕТСТВИИ С ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ ДЛЯ МЕЛКОФРАКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

2.1. Расчетом должны определяться следующие параметры бункера: размеры и форма выпускного отверстия, углы наклона стенок, материал покрытия стенок.

2.2. Бункера, выполненные в соответствии с рассчитанными параметрами, должны обеспечить истечение сыпучего материала без сводообразований и каналообразований. Под сводообразованием понимается остановка истечения вследствие образования устойчивого свода из сыпучего материала непосредственно над выпускным от-

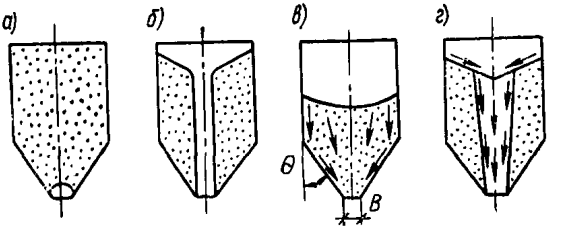


Рис. 5. Возможные случаи поведения сыпучего материала при выпуске из бункеров
а — сводообразование; *б* — каналообразование; *в* — гидравлическое истечение; *г* — негидравлическое истечение

верстием (рис. 5, *а*). Под каналообразованием понимается остановка истечения вследствие образования в сыпучем материале устойчивой вертикальной полости, диаметр которой равен диаметру или диагонали выпускного отверстия (см. рис. 5, *б*).

2.3. При расчете должна задаваться форма истечения: гидравлическая или негидравлическая. При гидравлическом истечении про-

исходит движение материала во всем его объеме, в том числе по стенкам (см. рис. 5, *в*). При негидравлическом истечении движется только центральная часть материала над выпускным отверстием, так называемая зона потока, а остальной материал находится без движения (см. рис. 5, *г*).

При выборе формы истечения необходимо руководствоваться следующим:

а) если бункера предназначены для слеживающихся или самовозгорающихся сыпучих материалов, их следует проектировать с гидравлической формой истечения. Негидравлическая форма истечения неизбежно приведет к зависанию сыпучего материала на стенках, образованию застойных зон, опасности самовозгорания зависшего материала и уменьшению полезной емкости бункера;

кроме того, бункера с гидравлическим истечением целесообразны в тех случаях, когда нужно избежать сегрегации сыпучего материала по крупности при выпуске;

б) если бункера предназначены для крупнокусковых твердых абразивных неслеживающихся материалов, их следует проектировать с негидравлической формой истечения.

2.4. Ширина выпускного отверстия при обеих формах истечения должна определяться по формуле

$$B \geqslant A \frac{f_c}{\gamma}, \qquad (7)$$

где B — ширина выпускного отверстия, см;

γ — объемный вес сыпучего материала, кг/см³;

A — безразмерный коэффициент, зависящий от вида истечения (гидравлического или негидравлического), формы выпускного отверстия (прямоугольной, квадратной, круглой), угла наклона стенок бункера. Определяется по графикам (рис. 6);

f_c — напряжение свободного истечения, кгс/см².

Величина f_c представляет собой обобщенный параметр сыпучего материала и определяется в зависимости от ряда его сдвиговых характеристик, а также от некоторых геометрических параметров воронки бункера: угла наклона стенок и формы воронки (конической, пирамидальной или лотковой). Определение величины f_c является наиболее трудоемкой частью расчета.

2.5. Для определения значения f_c необходимо иметь следующие сдвиговые характеристики сыпучего материала: функцию истечения,

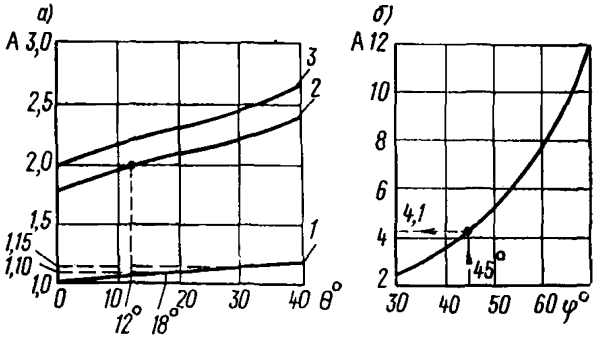


Рис. 6. Графики для определения коэффициента A

а — при гидравлическом истечении; *1* — прямоугольное отверстие (отношение сторон 1 : 3); *2* — квадратное отверстие; *3* — круглое отверстие; *б* — при негидравлическом истечении

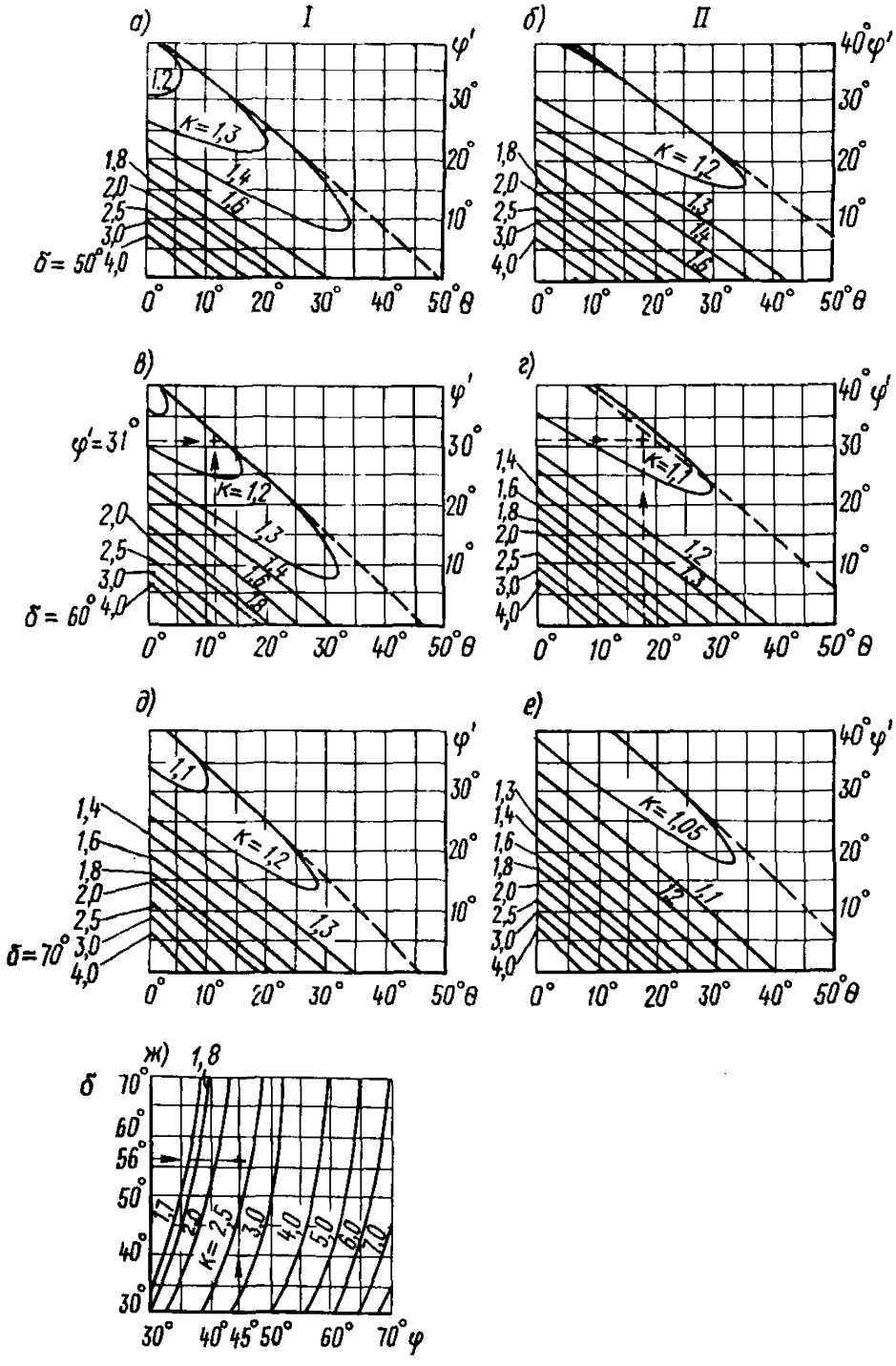


Рис. 7. Номограммы для определения коэффициентов истечения

I — для квадратной и круглой формы отверстия; *II* — для прямоугольной формы отверстия с отношением сторон менее 1 : 3; *а—е* — для гидравлического истечения; *ж* — для негидравлического истечения

величину углов внешнего трения, эффективных углов трения, углов внутреннего трения. Эти характеристики должны быть получены по методике, описанной в части 1 настоящего Руководства. Кроме характеристик сыпучего материала необходимо иметь специальные номограммы для определения коэффициентов истечения (рис. 7). Коэффициенты истечения даны на них в виде линий постоянных значений коэффициента истечения. Эти коэффициенты определены аналитическим путем в результате вычисления полей напряжения для стационарного потока сыпучего материала в сужающихся каналах. Номограммы составлены раздельно для различных форм выпускного отверстия бункера: круглой, квадратной или прямоугольной; различных значений эффективного угла трения δ; видов истечения: гидравлического и негидравлического.

2.6. По характеристикам материала с помощью номограмм определяется прежде всего коэффициент истечения k. Пример определения коэффициента истечения показан на рис. 7,*в*, где дается ключ к номограмме. Номограмма имеет два входа: угол внешнего трения φ' (имеющаяся характеристика) и угол наклона стенки бункера к вертикали θ (его значением задаются). Пересечение горизонтальной линии, соответствующей определенному значению угла внешнего трения (например, $\varphi'=31°$), и вертикальной, соответствующей определенному значению угла θ (например, $\theta=12°$), дает точку, лежащую либо на одной из линий номограммы, либо между линиями. Каждая линия номограммы соответствует постоянному значению коэффициента истечения.

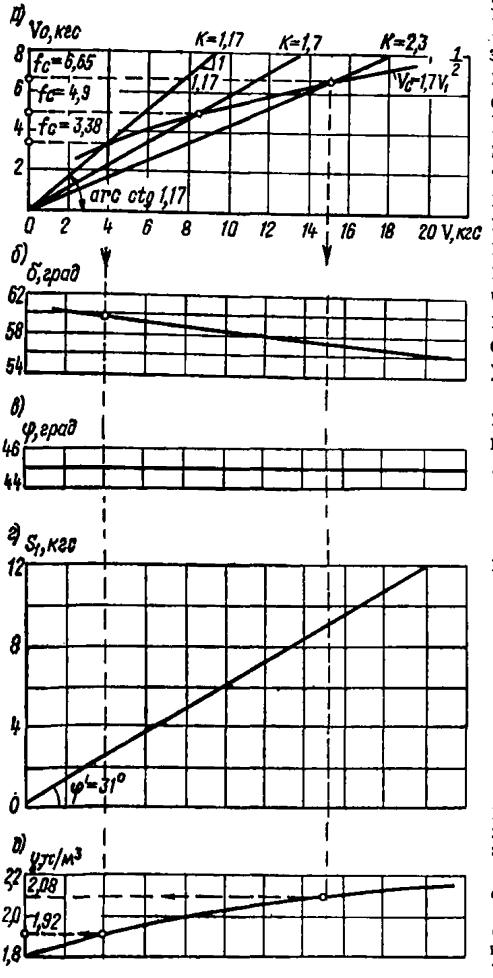


Рис. 8. Физико-механические характеристики материала заполнения к примеру расчета

а — функция истечения; *б* — эффективный угол трения δ; *в* — угол внутреннего трения φ; *г* — угол внешнего трения φ'; *д*—объемный вес γ

На рис. 7, *в* эта точка находится между линиями коэффициентов истечения $k=1{,}1$ и $k=1{,}2$, ближе к линии $k=1{,}2$. Поэтому величина k должна быть принята по интерполяции и составит $k=1{,}17$.

2.7. Величина f_c определяется непосредственно по коэффициенту истечения и функции истечения. Это может быть сделано одним из двух способов — графическим или аналитическим.

При графическом способе (рис. 8, *а*) на график функции истечения нужно нанести линию коэффициента истечения. Она представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат и образующую с осью абсцисс угол, котангенс которого равен коэффициенту истечения k. Ордината точки пересечения функции истечения с линией коэффициента истечения представляет собой величину f_c.

При аналитическом способе величина f_c определяется по формуле

$$f_c = a^{\frac{b}{b-1}} k^{\frac{1}{b-1}}, \qquad (8)$$

где a, b — эмпирические коэффициенты [см. формулу (6)];
k — коэффициент истечения.

2.8. Величина f_c может определяться как по мгновенной функции истечения, так и по временно́й. Временна́я функция должна применяться в тех случаях, когда по условиям технологии не предусмотрено непрерывное истечение сыпучего материала в течение суток.

2.9. *Для достижения гидравлической формы истечения* необходимо не только соблюдение вычисленных геометрических параметров, но и выполнение следующих конструктивных и технологических требований: двугранные углы воронки должны быть скруглены по всей высоте воронки; между призматической и пирамидальной частью бункера должен быть плавный переход; если выпускное отверстие прямоугольной формы оборудовано ленточным или пластинчатым питателем, то должны быть приняты меры, обеспечивающие эффективную работу выпускного отверстия по всей его длине, например, плоскость выпускного отверстия должна быть приподнята над лентой или полотном питателя на величину, составляющую не менее 10% длины выпускного отверстия и не менее полутора размеров максимального куска сыпучего материала.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ ДЛЯ КРУПНОКУСКОВОГО МАТЕРИАЛА

2.10. *Если натурный сыпучий материал* содержит не только мелкофракционную составляющую, но и крупные частицы, то его следует считать крупнокусковым, и расчет геометрических параметров бункера должен выполняться в два этапа.

2.11. На первом этапе определяются параметры бункера только для мелкофракционной составляющей, которая непосредственно испытывалась на сдвиговом приборе. Порядок расчета идентичен порядку расчета для мелкофракционного материала (см. пп. 2.1—2.9).

2.12. На втором этапе делается окончательный расчет с учетом процентного содержания мелкофракционной составляющей в натурном материале по следующей формуле:

$$B_г = B - (B - B_к)\left(1 - \frac{m}{100}\right)^2, \qquad (9)$$

где $B_г$ — размер выпускного отверстия бункера для крупнокускового материала;

B — размер выпускного отверстия, рассчитанный для мелкофракционной составляющей крупнокускового материала; определяется по пп. 2.1—2.9 настоящего Руководства;

$B_к$ — размер выпускного отверстия для крупной фракции. Натурный крупнокусковой материал рассматривается здесь как смесь, состоящая только из двух компонентов: крупной фракции и мелкофракционной составляющей;

m — процентное содержание мелкофракционной составляющей в натурном материале.

2.13. Величина $B_к$ должна определяться как для хорошо сыпучего кускового материала по формуле

$$B_к = (3 \div 5)\, a_{max}, \qquad (10)$$

где a_{max} — размер максимального куска сыпучего материала.

Применительно к процессу дробления крупнокусковых сыпучих материалов следует принимать $5a_{max}$ для продукта мелкого дробления при максимальном размере частиц 25—100 мм и $3a_{max}$ для продукта среднего дробления при крупности кусков до 300—400 мм.

При расчете на негидравлическое истечение, который ведется по условию исключения каналообразования, следует принимать $B_к = 0$, так как хорошо сыпучий кусковой материал не образует устойчивых каналов.

2.14. Размер выпускного отверстия, вычисленный для крупнокускового материала в целом, не должен быть меньше размера отверстия для крупной фракции:

$$B_г \geqslant B_к. \qquad (11)$$

2.15. Если сыпучий материал не содержит мелкофракционной составляющей (т. е. $m = 0$), его следует считать хорошо сыпучим и определять размер выпускного отверстия бункера по формуле (10). Величина углов наклона стенок бункера для такого материала не ограничивается условиями надежного истечения. Она должна определяться требованием экономичности конструкции бункера.

2.16. Углы наклона стенок бункера для крупнокускового материала, содержащего мелкофракционную составляющую, должны приниматься как для мелкофракционного материала.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРОВ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЧИВОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ

2.17. Из-за возможной изменчивости характеристик сыпучего материала, поступающего в бункер, расчет геометрических параметров следует вести таким образом, чтобы обеспечить требуемую надежность истечения материала, несмотря на изменение его характеристик. Основной фактор, влияющий на изменение характеристик, — это влажность материала, изменение которой носит, как правило, периодический характер.

2.18. Для выполнения расчета, обеспечивающего надежное истечение сыпучего материала в условиях переменной влажности, необходимо исследовать материал последовательно при нескольких пози-

циях влажности, каждый раз применяя в полном объеме методику, изложенную в части 1 настоящего Руководства, и получить характеристики для каждой позиции влажности материала. Изменение влажности достигается в лабораторных условиях искусственно путем увлажнения сыпучего материала при тщательном его перемешивании. После очередного увлажнения материал должен быть выдержан в законсервированном состоянии не менее 12 ч до начала испытаний.

2.19. После определения характеристик производится расчет геометрических параметров бункера для каждой из исследованных позиций влажности материала в соответствии с пп. 2.1—2,18. В результате расчета получается зависимость геометрических параметров, например размера выпускного отверстия бункера от переменной влажности сыпучего материала. Обычно зависимость размеров выпускного отверстия от переменной влажности носит экстремальный характер с явно выраженным максимумом. Интервал влажности для исследования материала должен выбираться в каждом конкретном случае с таким расчетом, чтобы выявить этот максимум.

2.20. При окончательном выборе размеров выпускного отверстия могут быть два случая: когда расчетная влажность может быть определена и когда ее определение затруднено.

2.21. Расчетная влажность может быть определена только на основании анализа статистических данных о распределении влажности материала на данном объекте в течение года или нескольких лет. В результате анализа строится гистограмма и функция статистического распределения влажности. Для окончательного выбора размеров выпускного отверстия бункера необходимо совместить графики зависимости размеров выпускного отверстия от влажности и функции статистического распределения влажности. Это дает возможность определять размеры отверстия в соответствии с желаемой надежностью истечения.

Надежность истечения следует принимать в размере 95%. Тогда в качестве расчетной влажности принимается такое предельное значение влажности, вероятность превышения которого составляет 5% (определяется по графику функции статистического распределения влажности), а в качестве окончательного значения размера выпускного отверстия принимается значение, соответствующее этой влажности (определяется по графику зависимости размеров выпускного отверстия от влажности, рис. 9).

2.22. Если статистических данных о распределении влажности нет и расчетную влажность определить невозможно, то окончательный выбор размеров выпускного отверстия делают только на основании зависимости размеров от влажности, руководствуясь самим характером этой зависимости. Здесь могут быть два случая:

1) сыпучий материал малосвязный; его физико-механические характеристики лишь в незначительной степени зависят от влажности. График зависимости размеров выпускного отверстия от влажности имеет вид пологой линии с невысоким максимальным значением или без выраженного максимума. В этом случае следует принять в качестве проектного размера выпускного отверстия его максимальный размер;

2) сыпучий материал отличается большой связностью; график зависимости размеров выпускного отверстия от влажности имеет крутой и резкий переход к максимальным значениям отверстия, которые могут оказаться нереально большими — до нескольких метров. В этом случае бункерование материала без специальных мероприя-

тий нецелесообразно. Возможен ряд вариантов таких мероприятий, как, например, ограничение влажности до определенного предела (тогда размер выпускного отверстия бункера следует назначать в соответствии с выбранным пределом влажности, по графику зависимости размеров выпускного отверстия от влажности; для ограничения влажности должна быть предусмотрена сушка материала); промывка

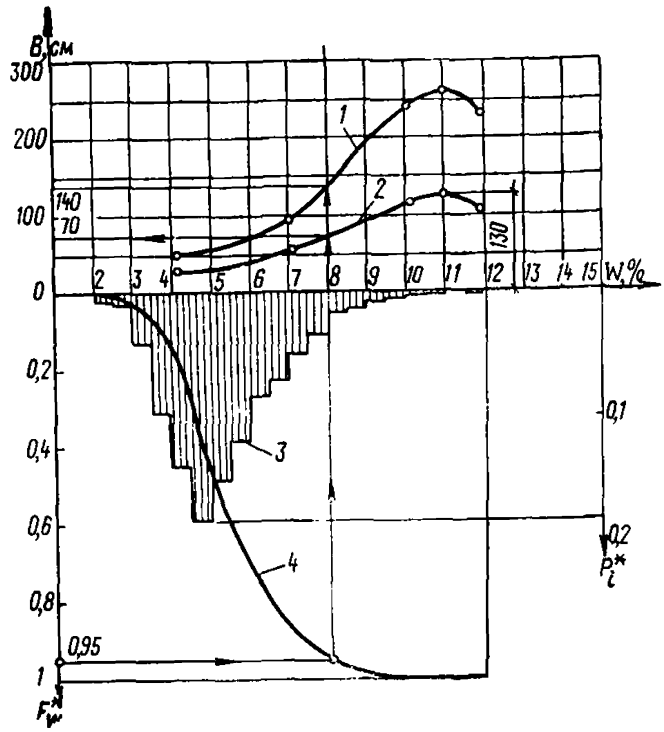


Рис. 9. Зависимость рассчитанных размеров выпускного отверстия бункера от влажности сыпучего материала

1 — квадратная форма выпускного отверстия; *2* — прямоугольная форма выпускного отверстия; *3* — гистограмма влажности сыпучего материала (P_i^* — частота случаев попадания влажности в интервал); *4* — функция статистического распределения влажности (F_W^* — сумма частот); W — влажность сыпучего материала; B — ширина выпускного отверстия бункера

материала с целью удаления мелких глинистых частиц, вызывающих повышенную связность; отказ от бункеров и замена их малоемкими воронками, работающими на проход, с погрузкой в воронки при помощи грейферных кранов. Окончательное решение должно приниматься на основании технико-экономического расчета вариантов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Требуется определить геометрические параметры бункера для мелкодробленого боксита крупностью 0—30 мм, влажность которого меняется в пределах 2,1—12%. Несмотря на изменение влажности, надежность истечения должна быть 95%. Бункер предназначен для второй очереди действующего завода. Имеются статистические данные об изменении среднесменной влажности за несколько лет (табл. 1).

Таблица 1

Граница интервала влажности, %	Число случаев попадания влажности в интервал	Частота случаев попадания влажности в интервал	Граница интервала влажности, %	Число случаев попадания влажности в интервал	Частота случаев попадания влажности в интервал
2,1—2,5	24	0,006	7,6—8	142	0,033
2,6—3	47	0,010	8,1—8,5	63	0,015
3,1—3,5	166	0,040	8,6—9	59	0,014
3,6—4	389	0,093	9,1—9,5	25	0,006
4,1—4,5	573	0,136	9,6—10	16	0,004
4,6—5	746	0,178	10,1—10,5	9	0,002
5,1—5,5	609	0,145	10,6—11	3	0,001
5,6—6	494	0,117	11,1—11,5	1	—
6,1—6,5	336	0,081	11,6—12	4	0,001
6,6—7	296	0,070			
7,1—7,5	202	0,048	Всего	4204	1

Для решения этой задачи были определены физико-механические характеристики фракции минус 3 мм при нескольких позициях влажности: 4,2; 7,1; 10,2; 11; 12%. Содержание фракции минус 3 мм в представительной пробе натурного материала составляло 40%.

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРА ПО ОТДЕЛЬНЫМ ПОЗИЦИЯМ ВЛАЖНОСТИ

Физико-механические характеристики при влажности 4,2% представлены на рис. 8.

Это функция истечения (см. рис. 8, *а*), эффективные углы трения (см. рис. 8, *б*), углы внутреннего трения (рис. 8, *в*), линия предела текучести у стенки, характеризующая угол внешнего трения по стали марки Ст3 (см. рис. 8, *г*), объемный вес (см. рис. 8, *д*). График функции истечения аппроксимирован линией $V_c = 1{,}7\,V_1^{\frac{1}{2}}$.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРА С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ИСТЕЧЕНИЕМ

Для расчета необходимо ориентировочно принять величины эффективного угла трения δ и угла внешнего трения φ'. Величина δ для исследованного боксита меняется в пределах 56—60° (см. рис. 8, *б*), поэтому принимаем $\delta = 60°$. Угол φ' почти не меняется и равен 31°. Кроме того, здесь следует принять форму выпускного отверстия бункера: квадратную, круглую или прямоугольную, так как от этого зависит выбор соответствующих коэффициентов в ходе последующего расчета.

Произведен расчет вначале для случая квадратной и круглой форм отверстия. Для характеристик $\delta = 60°$ и $\varphi' = 31°$ коэффициент истечения следует подбирать по номограммам (см. рис. 7, *в*). Коэффициент истечения определяется в зависимости от угла внешнего трения $\varphi' = 31°$ и угла наклона ребра воронки бункера к вертикали

θ, который предстоит выбрать. Для этого на рис. 7, *в* проводим горизонтальную линию, соответствующую значению $\varphi' = 31°$. Величину θ можно выбирать в данном случае лишь в пределах 0—13°. При большем значении угла θ гидравлическое истечение невозможно. Область гидравлического истечения на номограмме ограничена диагональной линией. Поэтому принимаем значение $\theta = 12°$, близкое к максимально допустимому. Значениям $\varphi' = 31°$ и $\theta = 12°$ соответствует коэффициент истечения $k = 1{,}17$.

На график функции истечения (см. рис. 8,*а*) наносим линию коэффициента истечения $k = 1{,}17$. Эта линия проходит через начало координат под углом к оси абсцисс, котангенс которого равен 1,17. Получившейся точке пересечения функции истечения и коэффициента истечения соответствует на рис. 8, *б* эффективный угол трения $\delta = 60°$, величина которого совпадает с ориентировочно принятой. Если совпадения нет; то ход расчета следует повторить: ориентировочно принять новое значение δ, еще раз определить коэффициент истечения и найти новую точку пересечения функции истечения и коэффициента истечения.

Получившаяся точка пересечения определяет величину $f_c' = 3{,}38$ кгс и объемный вес $\gamma = 1{,}92$ тс/м³.

Величину f_c можно определить и аналитически по формуле (8). Поскольку уравнение линии функции истечения в нашем случае $V_c = 1{,}7\,V_1^{\frac{1}{2}}$, то эмпирические коэффициенты $a = 1{,}7$; $b = 2$ [см. формулу (6)]. Тогда по формуле (8)

$$f_c' = 1{,}7^{\frac{2}{2-1}}\, k^{\frac{1}{2-1}} = 2{,}89\,k.$$

Так как $k = 1{,}17$, то $f_c' = 2{,}89 \cdot 1{,}17 = 3{,}38$ кгс.

Примечание. Обозначение величины f_c со штрихом принято для случая, когда эта величина выражена в единицах силы вместо единиц напряжения ввиду того, что функция истечения (рис. 8, *а*) построена в единицах силы; это обычно делается для удобства экспериментатора, так как замеры усилия по прибору снимаются в этих единицах.

Чтобы перевести величину f_c' в единицы напряжения, нужно разделить ее на площадь сечения применяемого сдвигового прибора (в данном случае 65,6 см²):

$$f_c = \frac{f_c'}{65{,}6} = \frac{3{,}38 \text{ кгс}}{65{,}6 \text{ см}^2} = 0{,}052 \text{ кгс/см}^2.$$

Ширина выпускного отверстия рассчитывается по формуле (7). Коэффициент A определяется по графику на рис. 6, *а*. Так как в расчете принят угол наклона ребра воронки $\theta = 12°$, то для квадратного выпускного отверстия $A = 2$. Тогда ширина выпускного отверстия

$$B \geqslant 2\,\frac{0{,}052}{1{,}92}\,1000 = 54 \text{ см}.$$

Если форму выпускного отверстия принять круглой, то все расчетные данные остаются такими же, за исключением коэффициен-

та A, который по графику на рис. 6, *а* для круглого отверстия равен 2,2. Тогда диаметр отверстия

$$B \geqslant 2{,}2\ \frac{0{,}052}{1{,}92}\ 1000 = 60\ \text{см}.$$

Угол наклона ребра воронки с квадратным отверстием или ее образующей в конической воронке с круглым отверстием в примере $\theta = 12°$. Угол наклона стенки воронки с квадратным выпускным отверстием должен быть вычислен по формуле

$$\operatorname{tg}\theta' = \frac{\operatorname{tg} 12°}{\sqrt{2}} = 0{,}15.$$

Получилась величина угла наклона стенки к вертикали $\theta' = 9°$.

Для прямоугольной формы выпускного отверстия принимаются другие значения коэффициента истечения, поэтому расчет прямоугольного отверстия будет с самого начала отличаться от расчета квадратного.

Исходные данные для расчета прямоугольного отверстия остаются теми же: $\delta = 60°$, $\varphi' = 31°$. Но величина коэффициента истечения подбирается по другим номограммам (см. рис. 7,*г*). Угол наклона стенок бункера можно выбирать здесь в более широких пределах: до 20°, а не до 13°, как при квадратной форме отверстия. Выбираем $\theta = 18°$, близкий к максимально возможному. Тогда коэффициент истечения $k = 1{,}1$, а величина $f_c' = 2{,}89 \cdot 1{,}1 = 3{,}18$ кгс, или

$$f_c = \frac{3{,}18}{65{,}6} = 0{,}049\ \text{кгс/см}^2.$$

Коэффициент A для прямоугольного выпускного отверстия по рис. 6, *а* равен 1,1, так как $\theta = 18°$. Тогда ширина выпускного отверстия по формуле (7)

$$B \geqslant 1{,}1\ \frac{0{,}049}{1{,}9}\ 1000 = 28\ \text{см}.$$

Длина выпускного отверстия должна быть не менее чем в три раза больше ширины, поэтому размер выпускного отверстия — $0{,}3 \times 0{,}9$ м.

Угол наклона ребра воронки с прямоугольным отверстием должен приниматься таким же, как для ребра воронки с квадратным отверстием.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРА С НЕГИДРАВЛИЧЕСКИМ ИСТЕЧЕНИЕМ

Как и в случае гидравлического истечения, необходимо принять ориентировочно величину эффективного угла трения δ, а вместо угла внешнего трения здесь принимается угол внутреннего трения φ. Целесообразно принять $\delta = 58°$, т. е. меньше, чем для гидравлического истечения, так как коэффициент истечения для негидравлического истечения обычно получается меньше, а точка пересечения его с функцией истечения лежит на графике правее. Угол внутреннего трения $\varphi = 45°$ приблизительно постоянен. Для $\delta = 58°$ и $\varphi = 45°$ по графику на рис. 7, *ж* определяется $k = 2{,}3$.

По формуле (8) $f_c' = 2{,}89 \cdot 2{,}3 = 6{,}65$ кгс, или

$$f_0 = \frac{6,65}{65,6} = 0,101 \text{ кгс/см}^2.$$

Коэффициент A определяется по графику рис. 6,*б* для $\varphi = 45°$ $A = 4,1$. По формуле (7) в случае негидравлического истечения определяется диагональ выпускного отверстия:

$$D \geqslant 4,1 \frac{0,101}{2,08} 1000 = 200 \text{ см}.$$

В соответствии с этим расчетом форма выпускного отверстия может быть круглой диаметром 2 м либо квадратной с диагональю также 2 м. Если принять отверстие прямоугольной формы, то его диагональ также должна быть 2 м, а его ширина не менее определяемой по формуле (7). Угол наклона стенок бункера не является в случае негидравлического истечения строго регламентированным. Рекомендуется принимать $\theta = 30°$. Коэффициент истечения при таком угле наклона равен 1,7, тогда

$$f_c' = 2,89 \cdot 1,7 = 4,9 \text{ кгс, или}$$

$$f_0 = \frac{4,9}{65,6} = 0,074 \text{ кгс/см}^2.$$

Коэффициент $A = 1,15$ принимается по графику на рис. 6, *а* для угла наклона стенок $\theta = 30°$

$$B \geqslant 1,15 \frac{0,074}{2,08} 1000 = 41 \text{ см}.$$

Длина прямоугольного выпускного отверстия

$$L = \sqrt{D^2 - B^2} = 1,95 \text{ м}.$$

Таким образом, размер прямоугольного отверстия составляет 0,4×1,95 м. Могут быть приняты и другие размеры сторон прямоугольного отверстия, например: 0,8×1,8; 1×1,7 м и т. д., при необходимом соблюдении условия, что диагональ должна быть равна 2 м. Объясняется это тем, что диагональ отверстия является расчетным размером для негидравлической формы истечения. Она должна быть больше критического диаметра устойчивого канала, который

Таблица 2

Геометрические параметры	Вид истечения					
	гидравлическое			негидравлическое		
	Форма выпускного отверстия					
	квадрат	круг	прямоугольник	квадрат	круг	прямоугольник
Размеры выпускного отверстия, см	54×54	∅ 60	30×90	140×140	∅ 200	40×195
Угол наклона стенок к горизонтали, град	81	81	72	60	60	60

может образоваться в сыпучем материале, и диаметр которого определяется по формуле (7).

Результаты расчета геометрических параметров бункера при влажности боксита 4,2% сведены в табл. 2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БУНКЕРА С УЧЕТОМ ПЕРЕМЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ

Так же, как для влажности 4,2%, были получены характеристики боксита и рассчитаны размеры выпускного отверстия бункера и для других позиций влажности.

Результаты расчета для гидравлического истечения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Влажность, %	4,2	7,1	10,2	11	12
Сторона квадратного отверстия, см	54	95	245	260	230
Угол наклона стенок к горизонтали, град	81	76	76	76	76
Ширина прямоугольного отверстия, см	30	55	115	130	105
Угол наклона стенок к горизонтали, град	73	70	70	70	70

По данным табл. 3 построены графики зависимости размеров выпускного отверстия от влажности материала (линии *1* и *2* на рис. 9). Зависимость имеет экстремальный характер и проходит через максимум, который наступает при влажности 11%.

Теперь по имеющимся статистическим данным необходимо построить гистограмму и функцию статистического распределения влажности. Гистограмма строится следующим образом: на оси абсцисс откладывается интервал влажности, а на оси ординат — частота попадания влажности в этот интервал, т. е. отношение числа случаев попадания в интервал к общему числу рассмотренных случаев, которое равно здесь 4204. Частота вычислена в табл. 1. Функция статистического распределения строится путем постепенного суммирования частот или ординат гистограммы. Результаты суммирования приведены в табл. 4.

График функции статистического распределения и график зависимости размеров отверстия от влажности строятся на одной и той же оси абсцисс — оси влажности (см. рис. 9). Это дает возможность их одновременного рассмотрения. Заданной вероятности 0,95 соответствует в данном случае влажность 8%. Это означает, что в 95% всех случаев влажность боксита не превзойдет 8%, а бункер, рассчитанный по физико-механическим характеристикам материала при

Таблица 4

Границы интервала влажности, %	2—3	2—4	2—5	2—6	2—7	2—8	2—9	2—10	2—11	2—12
Частота (вероятность) попадания влажности в интервал	0,016	0,149	0,463	0,725	0,876	0,957	0,966	0,996	0,999	1

влажности 8%, будет обладать надежностью в истечении 95%. Расчетной влажности 8% соответствует здесь ширина прямоугольного выпускного отверстия 70 см или сторона квадратного отверстия 140 см.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ВЫПУСКНОГО ОТВЕРСТИЯ С УЧЕТОМ КРУПНОСТИ МАТЕРИАЛА ЗАПОЛНЕНИЯ

Полученные размеры 70 см для прямоугольного отверстия и 140 см для квадратного можно было бы считать проектными при том условии, если бы максимальный размер частиц материала был 3 мм, т. е. материал состоял бы только из фракции, подвергнутой испытаниям на сдвиг. В действительности содержание этой фракции в натурном материале всего 40%, а размер максимального куска натурного материала 30 мм, поэтому окончательный расчет размеров выпускного отверстия должен производиться по формуле (9). Входящие в эту формулу параметры имеют в данном примере следующую величину: $B=70$ см для прямоугольного отверстия и 140 см для квадратного; $B_к=5\,a_{max}=15$ см; $m=40\%$.

Тогда ширина прямоугольного отверстия

$$B_г = 70 - (70 - 15)\left(1 - \frac{40}{100}\right)^2 = 50 \text{ см};$$

сторона квадратного отверстия

$$B_г = 140 - (140 - 15)\left(1 - \frac{40}{100}\right)^2 = 95 \text{ см}.$$

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 5

1. Методика определения физико-механических характеристик материала заполнения 6
   Сдвиговый прибор 6
   Построение линии предела текучести 7
   Определение характеристик материала заполнения по результатам сдвиговых испытаний 11
   Определение характеристик материала заполнения с учетом фактора слеживаемости материала 13
2. Расчет геометрических параметров бункеров в соответствии с физико-механическими характеристиками материала заполнения 15
   Определение геометрических параметров бункеров для мелкофракционного материала 15
   Определение геометрических параметров бункеров для крупнокускового материала 19
   Определение геометрических параметров бункеров с учетом изменчивости физико-механических характеристик материала заполнения 20

Приложение. Пример расчета 22

ЦНИИпромзданий Госстроя СССР

РУКОВОДСТВО
по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией Жигачева Г. А.
Редактор Волкова Е. А.
Мл. редактор Зудилина С. А.
Технический редактор М. В. Павлова
Корректоры Г. А. Кравченко, И. В. Медведь

Сдано в набор 10/II — 1978 г. Подписано в печать 15/III — 1978 г.
Т-05695 Формат 84×108 1/32 Бумага типографская № 3
усл. печ. л. 1,68 (1,76 уч.-изд. л.)
Тираж 15.000 экз. Изд. № XII—7384 Заказ № 180 Цена 10 к.

Стройиздат
103006, Москва, Каляевская, 23а

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г. Подольск, ул. Кирова, 25

gost.e-ecolog.ru