

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»
Кафедра технологии пищевых производств

Е.В. Волошин

ЭЛЕВАТОРЫ И СКЛАДЫ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья

Оренбург
2019

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73
В 68

Рецензент – кандидат технических наук, доцент С.В. Антимонов

Волошин, Е.В.
В 68 Элеваторы и склады: методические указания / Е.В. Волошин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019 – 53 с.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Элеваторы и склады» очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья по общему профилю подготовки.

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73

© Волошин Е.В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа №1 Физические параметры зерновой массы как сыпучего тела.....	5
1.1 Понятие о сыпучем теле	5
1.2 Физическая модель сыпучего материала.....	7
1.3 Параметры сыпучего материала	8
1.4 Порядок выполнения работы	17
1.5 Вопросы для контроля	20
2 Лабораторная работа №2 Определение угла естественного откоса зерновой смеси	20
2.1 Общие положения	20
2.2 Методы определения угла естественного откоса зерновой массы	25
2.3 Порядок выполнения работы	26
2.4 Вопросы для контроля	26
3 Лабораторная работа №3 Определение коэффициентов внутреннего и внешнего трения зерна	27
3.1 Общие положения	27
3.2 Практическое определение коэффициентов внешнего и внутреннего трения	33
3.3 Порядок выполнения работы	34
3.4 Вопросы для контроля	35
4 Лабораторная работа №4 Истечение сыпучего материала.....	36
4.1 Общие положения	36
4.2 Порядок выполнения работы	43
4.3 Вопросы для контроля	43
5 Лабораторная работа №5 Влияние плотности укладки сыпучего материала на производительность истечения	44
5.1 Общие положения	44
5.2 Порядок выполнения работы	51
5.3 Вопросы для контроля	52
Список использованных источников	53

Введение

На элеваторно-складскую промышленность, которая является технической базой системы государственного централизованного хлебооборота, возложены следующие основные обязанности:

- 1) принимать зерно в зависимости от района выращивания в течение 20-30 дней;
- 2) обрабатывать зерно (очищать, сушить, вентилировать и др.); на послеуборочную обработку зерна приходится более 30 % всех трудовых затрат при возделывании зерновых;
- 3) длительно хранить зерно (в зависимости от качества и его назначения);
- 4) принимать от семеноводческих хозяйств сортовое семенное зерно, семена трав, гибридные и сортовые семена кукурузы, обрабатывать их, хранить, снабжать ими хозяйства;
- 5) транспортировать зерно в районы потребления и экспорта;
- 6) обеспечивать зерном необходимого качества перерабатывающие предприятия (мукомольные, крупяные и др.);
- 7) снабжать (обеспечивать) население страны продуктами переработки зерна;
- 8) хранить государственные запасы на случай неурожая, стихийных бедствий и др.

Для решения этих задач элеваторно-складская промышленность располагает необходимой технической базой, которую в зависимости от целевого назначения, можно условно разделить на три звена.

Первое звено - заготовительное. Его основные задачи: принимать зерно от хлебосдатчиков, первично очищать, сушить, формировать крупные партии и хранить до отпуски на железнодорожный транспорт, водный или автомобильный.

К первому звену относят линейные (пристанционные, пристанские) и глубинные хлебоприемные предприятия, имеющие элеваторы и склады. Такие предприятия расположены в районе производства зерна, и их работа носит сезонный характер, так как основная масса зерна поступает в течение 20-30 суток, а отгружают зерно в течение всего года.

Второе звено - промежуточное. В нем осуществляют длительное промежуточное хранение зерновых запасов или передают его с одного вида транспорта на другой. Для обеспечения сохранности здесь также зерно очищают, сушат и проводят другие технологические операции. Ко второму звену относят базисные, фондовые и перевалочные предприятия.

В некоторых случаях на предприятия этого звена зерно поступает непосредственно от хлебосдатчиков.

Третье звено - конечное. Здесь зерно отпускают потребителям через производственные и портовые элеваторы (на экспорт).

Зерновая масса - сыпучее тело, т.е. и твердое, и жидкое одновременно. Знание свойств зерна как сыпучего материала и проходящих в нем механических процессов необходимо для проектирования предприятий.

1 Лабораторная работа №1 Физические параметры зерновой массы как сыпучего тела

Цель работы: Изучить физические параметры зерна, как сыпучего материала, научиться практически определять основные из них.

1.1 Понятие о сыпучем теле

Состояние сыпучего материала как сложной системы можно характеризовать следующими положениями.

С физической точки зрения сыпучий материал - это дисперсная двухфазная система «твердое тело + газ (жидкость)», которая существует при определенном соотношении фаз. Количественно это соотношение определяется коэффициентом плотности укладки частиц k :

$$k = \frac{V_m}{V}, \quad (1.1)$$

где V_T - объем твердой фазы, м^3 ;
 V - объем сыпучего материала, м^3 .

Сыпучий материал нужно рассматривать как статические совокупности твердых частиц, случайная ориентация которых в пространстве определена силами гравитационными, фрикционными и расклинивания.

Структура сыпучего материала представляет собой дискретную замкнутую систему контактирующих между собой частиц твердого тела. Контакты частиц характеризуются следующими условиями: нормальной прочностью на разрыв и тангенциальной прочностью в контактах значительно меньшей, чем прочность самих частиц.

Дисперсная двухфазная среда, удовлетворяющая этим условиям, становится сыпучим материалом. Рассмотрение сыпучего материала только с этих точек зрения позволяет дать ему полную характеристику, определить оплотнение, его существования.

Физический подход к сыпучему материалу позволяет определить границы его существования между газом (жидкостью) и твердым телом. Эти границы, с одной стороны, определены сорбентами, с другой - псевдооживленным слоем.

Следовательно, сыпучий материал - это дискретная статическая система частиц твердого тела, свойства которой определены параметрами его твердой и газовой фаз и их соотношением.[1]

1.1.1 Параметры твердой фазы

Параметры, характеризующие твердую фазу сыпучего материала, можно свести к следующим шести основным группам: измеряемые, структурные, фрикционные, теплофизические, аэродинамические, электрофизические.

В первую группу входят параметры, значения которых определяют измерением. К числу их относят гранулометрический состав, заданный законом распределения вида

$$df = (x_i) d_i, \quad (1.2)$$

Параметр x_i может принимать одно из значений: d - размера, S - поверхности, m - массы частицы. Учитывая, что частицы у большинства реальных сыпучих материалов неправильной формы, целесообразно вводить эквиваленты вида $d \approx d_{\text{э}}$, $S = S_{\text{эк}}$, заменяя при этом реальные частицы эквивалентным шаром с массой $M_{\text{э}}$, равной массе частиц M .

Если не наблюдается закон распределения (1.2), гранулометрический состав можно характеризовать:

1) средним арифметическим

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}. \quad (1.3)$$

2) дисперсией

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}. \quad (1.4)$$

Структурные параметры твердой фазы и подавляющем большинстве случаев можно рассматривать как параметры упругих тел. Их поведение при относительно небольших давлениях можно описать полностью тремя параметрами: плотностью ρ , модулем Юнга E , модулем Пуассона μ .

При больших давлениях и потере упругости частицы можно представить реологической моделью, описываемой пятью параметрами: модулем мгновенной деформации, модулем длительной деформации, временем релаксации, временем ретардации, модулем эластичных деформаций.

При изучении процессов в сыпучих материалах необходимо дополнить характеристику твердой фазы параметрами: работа статического разрушения, работа ударного разрушения, удельное усилие статического разрушения, удельное усилие ударного разрушения.

Фрикционные свойства частиц твердой фазы в зависимости от степени дисперсности определяются внешними или молекулярными силами. Параметры, характеризующие эти силы, можно подразделить на две группы:

для крупных частиц ($d > 100$ мкм) - коэффициент трения покоя, коэффици-

ент трения движения;

для мелких частиц ($d < 100$ мкм) - статическая и ударная сила отрыва частиц.

Перечисленные величины можно считать параметрами только при условии стабилизации адсорбированных пленок на поверхности частиц.

Теплофизические свойства частиц твердой фазы можно описать тремя параметрами: теплоемкостью, теплопроводностью, температуропроводностью.

Электрофизические свойства частиц твердой фазы характеризуются: активной и реактивной составляющей комплексной проводимости, комплексной диэлектрической проницаемостью и диэлектрическими потерями.

Для частиц органического происхождения теплофизические и электрофизические характеристики зависят от влажности, температуры, химического состава и других факторов.

Аэродинамическая характеристика частиц твердой фазы определяется скоростью витания частицы, скоростью уноса. Скорости воздушного потока, взвешивающие частицу (витания) и уносящие ее (уноса), постоянны и могут быть приняты в качестве параметров.

1.2 Физическая модель сыпучего материала

Физическая модель сыпучего материала, представляемая квазитвердым телом, получила распространение в механике, в грунтах. Она позволяет получить данные, приближенно описывающие статику сыпучего материала.

Созданные на этой основе теории не объясняют динамику процессов. Динамику процессов в сыпучих материалах в большинстве транспортных и технологических операций по-прежнему учитывают введением опытных коэффициентов. Такое положение создалось в результате неучета основного свойства сыпучего материала - его дискретности.

Только физическая модель сыпучего материала, основанная на его дискретности, поможет описать реальные процессы. Эта дискретность предполагает переход при определенных условиях к сплошности. Такой переход не правило, а исключение, частное для сыпучего материала, и вытекает из его модели.

Сыпучий материал как дискретная статическая система существует при следующих условиях:

- минимальном элементарном объеме; в меньшем теряется физический смысл существования сыпучего материала;

- максимальном объеме, определяемом размерами сосуда; в каждом слое сыпучего материала, расположенного на определенной высоте, может находиться только конечное число частиц. Между соседними слоями частиц сыпучего материала существует минимальная разность потенциальных энергий. Дискретность сыпучего материала определяет дискретный характер спектра потенциальной энергии по высоте слоя;

Для слоя сыпучего материала существует соотношение

$$\Delta l / \Delta p \leq A, \quad (1.5)$$

где Δl - изменение линейного размера;
 Δp - изменение удельного давления;
 A - постоянная.

Условие (1.5) определяет применение понятий: плотность укладки, давление в сыпучем материале и др.

В статике частицы сыпучего материала при увеличении коэффициента плотности укладки стремятся занять наименьшие уровни потенциальной энергии. Это характеризуется постоянной потерей частицами сыпучего материала способности к относительному перемещению. Теряя способность к перемещению, сыпучий материал как статическая совокупность вырождается. Вырождение характеризуется переходом дискретной структуры в сплошную, в результате чего сыпучий материал приобретает свойство твердого тела. Это позволяет рассматривать плотность укладки частиц сыпучих материалов как характеристику подвижности частиц совокупности.

Изменение величины плотности укладки частиц может носить локальный характер, не распространяясь на весь объем сыпучего материала. Такому изменению плотности свойственна локальная подвижность частиц, при которой частицы, находящиеся за пределами локального изменения плотности укладки, остаются неподвижными.

Значительное изменение плотности укладки частиц по всему объему влечет за собой их глобальную подвижность, которая обычно возникает под воздействием внешних сил.

Перечисленные свойства сыпучего материала аналогичны ряду известных статистик. Это позволяет с определенными допущениями пользоваться для описания физических явлений в сыпучем материале математическими методами существующих статистик. При этом необходимо всегда помнить о способности сыпучего материала как статик вырождаться при определенных условиях.

1.3 Параметры сыпучего материала

1.3.1 Плотность укладки

Это основной параметр, характеризующий сыпучий материал как дисперсную двухфазную систему.

Количественно плотность укладки частиц сыпучего материала характеризуется коэффициентом плотности укладки (1.1). Применительно к сыпучим материалам величину коэффициента целесообразно выражать в виде

$$k = \frac{V_m}{V} = \frac{\rho}{\gamma_0}, \quad (1.6)$$

где ρ - плотность твердой фазы, кг/м³;

γ_0 - объемная масса сыпучего материала, кг/м³.

В практике часто плотность укладки характеризуют различными коэффициентами, но в итоге с одним и тем же физическим смыслом.

Коэффициент плотности укладки, частиц сыпучего материала - величина непостоянная и изменяется в зависимости от условий формирования сыпучего материала в сосуде, условий движения его потока, условий на границах потока и т.д.

Характерен для коэффициента плотности тот факт, что при относительном перемещении слоев сыпучего материала его величина в зоне сдвига приобретает некоторое постоянное значение $k_{кр}$, лежащее между минимальным и максимальным. При этом, чем меньше средний размер частицы материала, тем величина $k_{кр}$ ближе к его минимальному значению.

Условия формирования сыпучего материала в сосуде существенно влияют на величину k в результате изменения ориентации частиц твердого тела. Изменение ориентации тесно связано с числом контактов, приходящихся в среднем на одну частицу. Чтобы получить устойчивую структуру сыпучего материала, необходимо наложение на каждую его частицу, как минимум, шести связей. Так как в общем случае каждый контакт эквивалентен трем связям (одном - одностороннего сжатия и двум - трения), то наименьшее число частиц должно быть две-три.

Процесс перестройки структуры протекает относительно быстро и завершается при выпуске из сосуда от 30 % до 35 % сыпучего материала. В общем случае для потока сыпучего материала, движущегося в сосуде, изменение плотности укладки частиц в горизонтальном сечении в зависимости от высоты приближенно можно описать экспонентой

$$k = ak_{max} \left[1 - e^{-b+cH} \right], \quad (1.7)$$

где a , b , c - постоянные (для пшеницы $a = 1$, $b = 1,6$, $c = 0,332$);

H - высота слоя, м.

Для сосудов относительно небольшого диаметра ($D < 500\delta$, где δ - характерный размер частиц) на величину плотности укладки частиц потока сыпучего материала заметно влияют граничные условия. Если на границе потока сыпучего материала создать местное сужение, коэффициент плотности укладки в месте сужения увеличивается. После прохода потоком местного сужения коэффициент плотности укладки частиц быстро принимает свое первоначальное значение. Если на пути движения потока установить ряд местных сужений, можно соответственно изменять и величины коэффициентов плотности укладки частиц в потоке.

Указанное свойство потока сыпучего материала может быть использовано для управления процессами в потоке сыпучего материала, в частности изменения

его аэродинамического сопротивления.

При заполнении сыпучим материалом сосуда возможны два характерных случая: гравитационный и инерционный. Гравитационная загрузка характеризуется преобладающим влиянием сил тяжести на изменение числа контактов, инерционная - тем, что величина сил инерции больше сил тяжести. Все остальные случаи лежат между двумя указанными.

При гравитационном способе укладки сыпучий материал загружается струей, падающей с небольшой высоты. Инерционные силы малы по сравнению с силами тяжести. Частицы сыпучего материала укладываются при минимальном числе их контактов с соседними, что обеспечивает наименьшее значение коэффициента плотности укладки частиц.

При инерционном способе укладки сосуд загружается сыпучим материалом, падающим с большой высоты. Уплотнение материала происходит в основном под влиянием удара частиц, при этом включается большее число контактов. При падении с высоты 2,5-3 м проявляются признаки инерционного способа укладки. Эту высоту считают для сыпучего материала (зерна) границей перехода от одного способа загрузки к другому.

Для основных зерновых культур при влажности зерна от 12,5 % до 13,5 % коэффициент плотности укладки принимает следующие значения от минимального до максимального (таблица 1.1)

Заметно влияют на плотность укладки сыпучего материала фрикционные свойства частиц. При увеличении коэффициента трения частиц включение связей трения затруднено и, как следствие, связи трения заменяются связями одностороннего сжатия менее интенсивно.

Способ загрузки сосуда сыпучим материалом определяет величину коэффициента плотности укладки. При движении потока сыпучего материала в сосуде плотность укладки изменяется, на нее влияют размеры потока по сечению и условия на его границах.

Таблица 1.1 – Значения коэффициента плотности укладки

Культура	Значение
Пшеница	0,555-0,645
Рожь	0,55-0,64
Гречиха	0,54-0,62
Ячмень	0,405-0,595
Кукуруза (зерно)	0,555-0,615
Соя	0,565-0,625

Сформированный в сосуде сыпучий материал при выпуске из отверстия, расположенного в дне, изменяет первоначальную плотность укладки частиц. Изменение величины коэффициента плотности укладки происходит от начальной величины k_0 до некоторой постоянной, для данного горизонтального сечения по высоте потока, равной критической плотности укладки частиц $k_{кр}$. При этом в

случае $k_0 = k_{\min}$ происходит уплотнение потока, а при $k_0 = k_{\max}$ - разрыхление.

1.3.2 Объемная плотность

Этим параметром характеризуют гравитационные силы сыпучего материала. Величину объемной плотности определяют из уравнения (1.5).

Как видно из уравнения, γ_0 зависит от величины коэффициента плотности укладки сыпучего материала и может для одного и того же материала колебаться в больших пределах.

1.3.3 Гранулометрическая и грануломорфологическая характеристики

Определяются они дифференциальной кривой, которую строят для каждого сыпучего материала в системе координат - измеряемая характеристика частиц твердой фазы и частота повторения этих характеристик.

Гранулометрическая характеристика твердой фазы сыпучего материала может быть дана по его главным размерам (длине l , ширине b , толщине a), эквивалентным диаметру частиц $d_{\text{эк}}$ - диаметр шара, объем которого равен объему частицы твердой фазы V_m

$$d_{\text{эк}} = \sqrt[3]{\frac{6V_m}{\pi}}. \quad (1.8)$$

Грануломорфологическая характеристика оценивает форму и характер поверхности частиц и обычно задается коэффициентом формы K_ϕ

$$K_\phi = \frac{S_m}{\pi d_{\text{эк}}^2}, \quad (1.9)$$

где S_m - поверхность частицы сыпучего материала.

1.3.4 Фрикционные связи

Такие связи на поверхности частиц определяются характером поверхности частиц, их размерами и т.д. В зависимости от характера этих связей условимся подразделять сыпучие материалы на идеальные и связанные.

Под идеальными сыпучими материалами понимают такие, у которых между частицами твердого тела существуют только связи трения и одностороннего сжатия, действующие в плоскости элементарных контактных площадок (зерно, сухой песок, гравий, щебень). Силами сцепления в сыпучем материале ввиду их малости без большой погрешности пренебрегают.

Под связанными понимают такие сыпучие материалы, у которых связи между частицами твердого тела определяются силами трения и сцепления, дей-

ствующими на одних и тех же плоскостях контактов (мука, цемент).

Из принятого определения связи для идеальных сыпучих материалов характеризуются коэффициентом внутреннего трения, а для связанных - коэффициентом внутреннего трения и коэффициентом сцепления.

1.3.5 Фрикционные свойства

Характер передачи энергии в сыпучем материале в значительной степени определяется силами трения и сцепления на контактах его частиц. Эти же силы определяют поведение сыпучего материала в надкритическом состоянии, когда плотность укладки изменяется от некоторого критического значения $k_{кр}$ до минимального $k_{мин}$. Эти свойства сыпучего материала условно можно назвать фрикционными. Они определяются углом естественного откоса (угол внутреннего трения на поверхности сыпучего материала), коэффициентом сопротивления сдвига одного слоя сыпучего материала по другому, коэффициентом сопротивления сдвига сыпучего материала по ограждающей поверхности. Последние два коэффициента - комплексные величины.

Для каждого конкретного сыпучего материала при определенных условиях фрикционные свойства можно расчленить на величины предельного сопротивления сдвига (слоя по слою, слоя по стенке), коэффициенты трения (внутреннего, внешнего), величины сопротивления разрыва (внутри слоя, слоя от стенки).

Для случая зернистых материалов (зерно злаков) сыпучий материал может считаться идеальным, для которого сцепление между частицами мало и может быть опущено. Между его частицами и между частицами и стенками сосуда существуют только связи трения.

Трение в сыпучем материале - явление комплексное и определяется, с одной стороны, трением по контактными поверхностям частиц материала, с другой - связано с перестройкой структуры сыпучего материала, происходящей в результате упругой деформации частиц твердой фазы и остаточной деформации (изменение плотности укладки частиц).

Наиболее полно процесс трения в сыпучем материале проявляется при внутреннем трении, когда в процесс вовлекается слой сыпучего материала и поверхность сдвига как таковая отсутствует.

При внешнем трении, которое возникает при относительном смещении сыпучего материала по стенкам сосуда, трение обусловлено процессами в пограничном слое.

1.3.6 Внутреннее трение

Даже для идеального сыпучего материала оно носит сложный комплексный характер. Происходя в слое сыпучего материала, трение определяется площадями фактических контактов, их числом, зависящим от плотности укладки, упругими свойствами частиц твердой фазы, размерами и формой частиц, состоянием их поверхности и другими факторами.

Сложность процессов внутреннего трения в сыпучих материалах не позво-

ляет раскрыть его качественную сторону и получить зависимости, количественно характеризующие процесс. Однако влияние ряда факторов доказано. В частности, на величину коэффициентов внутреннего трения оказывают влияние плотность укладки частиц и связанная с ней подвижность частиц.

Величина коэффициентов внутреннего трения изменяется от некоторых минимальных значений, которым отвечает наибольшая подвижность частиц сыпучего материала, до максимального значения, соответствующего вырождению сыпучего материала, при котором подвижность частиц стремится к нулю, т.е.

$$f_{min} < f < f_{max}. \quad (1.10)$$

Минимальное значение коэффициента внутреннего трения характеризуется значениями критерия P , близкими к нулю.

$$P = \frac{k - k_{min}}{k_{max} - k}. \quad (1.11)$$

Этому требованию отвечают частицы, лежащие на поверхности сыпучего материала, для которых величина коэффициента внутреннего трения равна тангенсу угла естественного откоса, т.е. $f_{min} = tg \varphi$.

Максимальное значение коэффициента внутреннего трения отвечает максимальному значению коэффициента плотности укладки, при котором сыпучий материал обладающее статистическими свойствами вырождается. При этом процесс трения в плоскости сдвига заменяется процессом среза твердой фазы.

Величина коэффициента внутреннего трения для зерна пшеницы может быть выражена уравнением

$$f = f_{min} + a \frac{k - k_{min}}{k_{max} - k}, \quad (1.12)$$

где k_{min} , k_{max} - соответственно минимально и максимально возможные значения коэффициентов плотности укладки частиц сыпучего материала;

a - постоянная;

f_{min} - минимальное значение коэффициента внутреннего трения.

Так как плотность укладки по сечению потока, движущемуся в вертикальном цилиндрическом сосуде, изменяется с высотой слоя, то соответственно изменяется и коэффициент внутреннего трения.

Зависимость изменения величины коэффициента внутреннего трения потока пшеницы от высоты слоя зерна в силосе в первом приближении можно описать эмпирической формулой

$$f = f_{min} + a_1 (1 - e^{-b_1 H}), \quad (1.13)$$

где a_1, b_1 - постоянные (для пшеницы $a_1 = 1,8, b_1 = 0,1$);

H - высота слоя, м.

Величина f для сыпучих материалов приведена в таблице 1.2. Гранулометрический состав сыпучего материала заметно влияет на величину коэффициента внутреннего трения. Это объясняется тем, что с увеличением размера частиц увеличивается фактическая площадь контактов между ними. Одновременно с этим усиливается послойное зацепление между двумя соседними рядами частиц, но которым происходит сдвиг слоев сыпучего материала.

В сыпучем материале, состоящем из частиц разных размеров, величина коэффициента внутреннего трения изменяется по закону

$$f = \varphi d^n + \beta, \quad (1.14)$$

где φ, n, β - постоянные;

d - диаметр частиц, мм.

Влажность сыпучего материала по-разному влияет на величину коэффициента внутреннего трения. Для зерна по мере увеличения влажности вначале отмечается линейное изменение коэффициента трения, что объясняется изменением размеров контактных площадок между частицами. При некоторой критической влажности зерна $\omega_{кр}$ происходит изменение механических свойств частиц, вследствие чего трение в контактах частиц заменяется срезом, сопротивление которому остается постоянным до некоторого предела изменения влажности частиц.

Таблица 1.2 – Величина коэффициента внутреннего трения пшеницы для различной глубины слоя

Глубина H слоя зерна, м	Величина коэффициента внутреннего трения f	Угол внутреннего трения φ , град	Глубина H слоя зерна, м	Величина коэффициента внутреннего трения f	Угол внутреннего трения φ , град
2	0,72	36	18	2,02	64
4	1,17	49	20	2,06	64,3
6	1,30	52	22	2,11	64,7
8	1,50	56	24	2,14	65
10	1,66	59	26	2,17	65,3
12	1,75	60	28	2,19	65,5
14	1,85	61,5	30	2,20	65,7
16	1,94	63	32	2,21	65,7

1.3.7 Внешнее трение

Характеризует процесс сдвига сыпучего материала по ограждающей его поверхности. Сам по себе процесс сдвига - явление комплексное, и лишь очень приближенно его можно описать уравнением Амонтон-Кулона.

Величина коэффициента сопротивления сдвига непостоянна и зависит в основном от нормального давления сыпучего материала на ограждающую поверхность. Это объясняется тем, что в процессе сдвига сыпучего материала в области, прилегающей к ограждающей поверхности, происходит с определенным затуханием послойная передача энергии упругих деформаций и количества движения от наружных слоев к внутренним.

При незначительных по величине сдвигающих усилиях, но способных преодолеть сил сопротивления на контактах частиц, сыпучий материал смещается по ограждающей поверхности в плоскости контактов частиц материала с поверхностью.

При увеличении сдвигающих усилий наступает момент, когда частицы сыпучего материала, лежащие в пристенном слое, под действием тангенциальных сил изменяют свое положение. Начинается процесс вырождения: вначале в пристенном слое, затем он охватывает более глубокие слои.

1.3.8 Сыпучесть и самосортирование зерновых масс

Способность зерна и зерновой массы перемещаться по какой-либо поверхности, расположенной под некоторым углом к горизонту, называют сыпучестью. Зерновая масса обладает хорошей сыпучестью, что используют при перемещении зерна конвейерами, нориями и другими средствами, при загрузке зерна в бункера, силосы и выпуске из них самотеком. Сыпучесть зерновой массы определяет минимальный угол наклона бункеров и силосов на элеваторах, мукомольных, крупяных, комбикормовых заводах, ее учитывают при расчетах зернохранилищ на прочность и т.д.

Сыпучесть зерновой массы характеризуют углом естественного откоса, т.е. углом между диаметром основания и образующей конуса, получающегося при свободном падении зерновой массы на горизонтальную плоскость. На сыпучесть зерновой массы влияют многие факторы: гранулометрический состав и гранулометрическая характеристика (форма, размеры, характер и состояние поверхности зерен), влажность, количество примесей и их видовой состав, материал, форма и состояние поверхности самотечной трубы.

Наиболее сыпучи зерновые партии, состоящие из семян шарообразной формы с гладкой поверхностью (просо, горох, соя). При отклонении от этой формы сыпучесть зерна ухудшается. Зерна продолговатые, тонкие, с шероховатыми оболочками или цветковыми пленками обладают меньшей сыпучестью. Примеси, особенно легкие и мелкие или имеющие шероховатую поверхность, снижают сыпучесть зерновой массы. Увеличение влажности зерновой массы приводит к снижению сыпучести и увеличению угла естественного откоса. Сыпучесть зерновой массы снижается при хранении вследствие уплотнения и служит косвенным показателем состояния хранящегося зерна.

Самосортирование возникает при перемещении, встряхивании и движении зерновой массы на конвейерах, в кузове автомобиля или железнодорожных вагонах, при заполнении складов и силосов, при выгрузке из них зерна. Во время движения (встряхивания) легкие компоненты зерновой массы (легкие примеси,

мелкие и щуплые зерна и др.) перемещаются в верхние слои, а тяжелые - в нижние, т.е. нарушается однородность состава партии зерна.

Во время загрузки силосов наблюдается наибольшее самосортирование. Этому способствует сопротивление, оказываемое воздухом движущимся частицам. Крупные, тяжелые зерна и другие частицы с большей плотностью подаются в силос вертикально и с большей скоростью, чем легкие. Они заполняют центральную часть силоса. Мелкие, битые, щуплые зерна и легкие примеси уносятся вихревыми потоками воздуха к стенам силоса или скатываются по поверхности конуса, образуемого зерновой массой.

В результате самосортирования качество зерна в различных частях силоса будет неодинаково: в центре силоса находится доброкачественное зерно с большей натурой (объемной массой), менее засоренное, чем около стен, где накапливаются легкие органические примеси, пыль, семена сорняков, щуплые, дробленые зерна, имеющие повышенную влажность. Выпуск зерновой массы из силосов не устраняет последствий самосортирования при заполнении. Характер истечения зерна из силосов не способствует перемешиванию зерна.

Таким образом, самосортирование зерновой массы явление нежелательное, нарушение однородности партии зерна в хранилище затрудняет правильную оценку его качества как в силосе, так и при отгрузке из него, а также способствует развитию различных физиологических и микробиологических процессов в тех местах насыпи, где сосредоточены компоненты с повышенной жизнедеятельностью.

1.3.9 Скважистость зерновой массы

Зерновая масса при размещении в складах или силосах не образует плотной массы; между ее твердыми компонентами остаются свободные промежутки, заполненные воздухом. Часть объема зерновой массы, занятая зерном и другими твердыми частицами (примеси, семена других культурных растений и пр.), характеризует плотность укладки зерна. Остальную часть объема зерновой массы, заполненную воздухом, называют скважистостью. Плотность укладки зерна и скважистость выражают в процентах от общего объема зерновой массы.

Наличие скважин и воздуха в зерновой массе обуславливает практическое значение скважистости. Перемещение воздуха по скважинам способствует передаче тепла путем конвекции, перемещению влаги через зерновую массу в виде пара. Влажность и температура зерновой массы во время хранения изменяются. Характер физиологических и микробиологических процессов в зерновой массе зависит от количества и состава воздуха в межзерновых пространствах. Благодаря скважинам возможны сушка, активное вентилирование и газация зерна.

Скважистость и плотность укладки зерновой массы в хранилище зависят от формы, упругости, размеров и состояния поверхности твердых компонентов зерновой массы, количества и вида примесей в ней, от размера партии и влажности зерновой массы, формы и размеров хранилища, а также от срока хранения.

Зерновая масса, состоящая из крупных, мелких, тонких и коротких зерен и

других частиц, укладывается более плотно и обладает меньшей скважистостью, чем выровненная зерновая масса. Влажное и сырое зерно лежит менее плотно и занимает больший объем в хранилище, чем сухое зерно при прочих одинаковых условиях. Однако повышение влажности зерна во время хранения сопровождается увеличением объема единичных зерен за счет межзерновых пространств и уплотнением всей массы. В хранилище с большим поперечным сечением зерно размещается плотнее, чем с малым. При продолжительном хранении зерновая масса уплотняется и ее скважистость уменьшается. Таким образом, величина скважистости и плотности укладки зерновой массы может изменяться в довольно значительных пределах.

1.4 Порядок выполнения работы

1. Построить гранулометрическую характеристику зерна пшеницы по трем характерным размерам: длине, ширине и толщине. Используя ее, определить среднеарифметические размеры зерна.

2. Используя среднеарифметические размеры зерна рассчитать коэффициент сферичности зерна и коэффициент формы зерна по следующим выражениям.

Коэффициент сферичности

$$\phi = \frac{S_{ш}}{S_3}, \quad (1.15)$$

где $S_{ш} = \pi d_{эк}^2$ - поверхность шара эквивалентного по объему;
 S_3 - поверхность частицы сыпучего материала.

$$d_{эк} = \sqrt[3]{\frac{6V_3}{\pi}}, \quad (1.16)$$

где $d_{эк}$ - диаметр шара, объем которого равен объему зерновки мм;
 V_3 - объем зерна, м³.

Площадь внешней поверхности пшеницы, ржи, ячменя, овса, риса (т.е. истинных злаков) определяют по формуле, предложенной проф. Г.А. Егоровым:

$$S_3 = \frac{\pi}{9} a + b + l \approx 0,35 a + b + l, \quad (1.17)$$

где a, b, l - линейные размеры зерна, мм

3. Определить массу и объем 1000 зерен.

Общий объем зерновой массы (1000 зерен) определяют по формуле

$$V_o = \frac{1000P}{\gamma}, \quad (1.18)$$

где P - масса 1000 зерен, г;

γ - объемная масса зерна г/л, определяемая на приборе ПХ - 1.

4. Рассчитать коэффициент плотности укладки K зерна, скважистость S .

Плотность укладки - основной параметр, характеризующий сыпучий материал как дисперсную двухфазную систему.

Количество плотности укладки характеризуется коэффициентом плотности укладки:

$$K = \frac{\gamma}{\rho} = \frac{V_t}{V_o}, \quad (1.19)$$

где ρ - плотность твердой фазы, г/см³;

γ - объемная масса сыпучего материала, г/см³;

V_t - объем твердых частиц (зерновок), см³;

V_o - общий объем, занимаемый зерновой массой, см³.

Скважистость - это отношение объема, занятого промежутками между твердыми частицами зерновой массы, к общему объему, занятому зерновой массой. Скважистость зерна определяют по формуле

$$S = \frac{W - V}{W} 100, \quad (1.20)$$

где W - общий объем, занимаемый зерновой массой, см³;

V - истинный объем твердых частиц зерновой массы, см³.

5. Найти объем единичного зерна V_3 двумя способами. По формуле:

$$V_3 = kabl, \quad (1.21)$$

где k - коэффициент, учитывающий особенности формы зерна: для пшеницы и ячменя $k = 0,52$; для ржи и овса $k = 0,42$; для проса, сорго, гороха $k = 0,56$.

И методом погружения 1000 зерен в мерный цилиндр с жидкостью по формуле:

$$V_3 = \frac{V_2 - V_1}{1000} = \frac{V_t}{1000}, \quad (1.22)$$

где V_1 - объем жидкости, см³;

V_2 - объем жидкости после погружения в нее 1000 зерен, см³.

V_t - объем твердых частиц (зерновок), определяют погружением зерна в жидкость в мерном сосуде, см³;

6. Непосредственным замером 30 зерновок определить средние размеры: длину, ширину и толщину. Результаты занести в таблицу 1.3.

7. Определить массу 1000 зерен - по ГОСТ ISO 520-2014. Результаты опытов занести в таблицу 1.5.

8. Определить истинный объем зерна (1000 зерен). Результаты опытов занести в таблицу 1.5.

9. Определить объемную массу зерна на литровой пурке. Результаты опытов занести в таблицу 1.5.

Таблица 1.3 – Геометрические размеры культур

Культура	Размеры, мм		
	длина	ширина	толщина
min			
max			
Среднеарифметический размер			

Таблица 1.4 – Основные физические параметры культур

Культура	Среднеарифметические линейные размеры, мм			Объем зерна $V_{3,3}$ мм ³	Площадь внешней поверхности зерна S_3 , мм ²	Сферичность зерна \varnothing	$d_{эк}$, мм
	a	b	l				

Таблица 1.5 - Основные физические параметры зерна

Показатель	Обо- знач.	Ед. изм.	Повторности				Среднее значение
			1	2	3	4	
Масса 1000 зерен							
Истинный объем зерна							
Объемная масса зерна							
Общий объем							
Коэффициент плотности укладки							
Скважистость							
Объемная масса зерна							

1.5 Вопросы для контроля

1. Какое значение имеют размеры и форма частиц сыпучего материала (зерна) для организации технологического процесса переработки зерна.
2. Чем характеризуются крупность и форма зерна.
3. Способы определения линейных размеров зерна.
4. Что характеризует коэффициент плотности укладки зерна K , каким образом можно его определить.
5. Типичные формы злаковых и бобовых культур.

2 Лабораторная работа №2 Определение угла естественного откоса зерновой смеси

Цель работы: Изучить физические параметры зерна, как сыпучего материала, научиться практически определять угол естественного откоса зерновой массы

2.1 Общие положения

Зерновая масса представляет собой совокупность огромного количества индивидуальных зерен и различных включений.

В состав всякой партии зерна входит зерновая масса. Отличительными особенностями зерновой массы является наличие огромного количества мелких частиц и их неоднородность.

Зерновая масса, образующаяся при обмолоте снятого урожая, состоит из громадного количества зерен основной культуры и частиц разнообразных примесей. Так, в 1 кг пшеницы содержится около 40 тыс. зерен.

Составные части зерновой массы неоднородны, в том числе и партия зерна, которая по внешним признакам (органолептическим) считается однородной. В данном случае речь идет о более тонком и точном понимании однородности, чем при органолептической оценке.

Вследствие неодинаковости условий цветения, роста и налива зерна в зависимости от места нахождения в соцветии (колосе, метелке, кисти), рельефа, почвенных и микроклиматических особенностей на различных участках поля все зерна основной культуры отличаются индивидуальными особенностями. В той или иной степени они неоднородны по размерам, выполненности, состоянию поверхности, цвету, влажности, химическому составу, плотности и другим показателям.

Уборка урожая увеличивает неоднородность зерновой массы. Появляются зерна с механическими повреждениями: с нарушенными оболочками, треснувшие, расколотые.

При уборке урожая в зерновую массу попадают различные примеси: семена сорных и других культурных растений, органические (части стеблей и стержней колоса, колосковые чешуйки, ости, полова) и минеральные (земля, песок, пыль).

Примеси, увеличивая неоднородность зерновой массы, излишне загружают хранилище, усложняют хранение и переработку зерновой массы.

Семена сорных растений обычно имеют более высокую влажность. Они повышают влажность соседних с ними зерен основной культуры. Интенсивность дыхания тех и других усиливается, создаются благоприятные условия для развития микроорганизмов и, в конечном счете, для самосогревания.

Очистка от примесей при переработке зерна требует дополнительных трудовых затрат использования машин и энергии, что удорожает производственный процесс.

На зерне и других составных частях зерновой массы в поле, а также при уборке, хранении и транспортировании поселяется и живет большое количество микроорганизмов (до нескольких миллионов экземпляров в 1 кг зерновой массы), способных серьезно влиять на состояние и качество зерна. Между зернами основной культуры и частицами ее примесей остаются свободные воздушные полости - скважины. Заполняясь продуктами жизнедеятельности зерна и живых примесей, зерновой массы (семян сорных растений, микроорганизмов), воздух межзерновых пространств принимает участие в процессах, совершающихся в зерновой массе.

Нередко в зерновой массе содержатся вредители (насекомые, клещи), которые при известных условиях могут оказать большое влияние на состояние и качество зерна.

Таким образом, зерновая масса состоит из следующих составных частей: неоднородных по доброкачественности и состоянию зерен основной культуры; семян других культурных и сорных растений, также неоднородных по своим физическим и физиологическим показателям; различных органических и минераль-

ных примесей; микроорганизмов; воздуха межзерновых пространств; вредителей - насекомых или клещей (в зараженных партиях).

Сложная зерновая масса, состоящая в основном из живых биологических систем, имеет ряд характерных для нее свойств, в ней происходят разнообразные процессы. Этими свойствами и процессами определяются методы и условия хранения и переработки зерновой массы.

Зерновая масса довольно легко заполняет бункер любой конфигурации, и при известных условиях может истекать из нее. Большая подвижность зерновой массы - ее сыпучесть - объясняется ее гранулометрическим составом. Масса в своей основе состоит из отдельных мелких твердых частиц - зерен основной культуры и различных примесей. Так, в 1 т зерновой массы пшеницы и проса соответственно насчитывают 30-40 и 150-190 млн. зерен. [2]

Способность зерна и зерновой массы перемещаться по какой-либо поверхности, расположенной под некоторым углом к горизонту, называют сыпучестью. Зерновая масса обладает хорошей сыпучестью, что используют при перемещении зерна конвейерами, норями и другими средствами, при загрузке зерна в бункера, силосы и выпуске из них самотеком. Сыпучесть зерновой массы определяет минимальный угол наклона бункеров и силосов на элеваторах, мукомольных, крупяных, комбикормовых заводах, ее учитывают при расчетах зернохранилищ на прочность и т.д.

Сыпучесть зерновой массы характеризуют углом естественного откоса, т.е. углом между диаметром основания и образующей конуса, получающегося при свободном падении зерновой массы на горизонтальную плоскость. На сыпучесть зерновой массы влияют многие факторы: гранулометрический состав и гранулометрическая характеристика (форма, размеры, характер и состояние поверхности зерен), влажность, количество примесей и их видовой состав, материал, форма и состояние поверхности самотечной трубы.

Наиболее сыпучи зерновые партии, состоящие из семян шарообразной формы с гладкой поверхностью (просо, горох, соя). При отклонении от этой формы сыпучесть зерна ухудшается. Зерна продолговатые, тонкие, с шероховатыми оболочками или цветковыми пленками обладают меньшей сыпучестью. Примеси, особенно легкие и мелкие или имеющие шероховатую поверхность, снижают сыпучесть зерновой массы. Увеличение влажности зерновой массы приводит к снижению сыпучести и увеличению угла естественного откоса. Сыпучесть зерновой массы снижается при хранении вследствие уплотнения и служит косвенным показателем состояния хранящегося зерна.

Самосортирование возникает при перемещении, встряхивании и движении зерновой массы на конвейерах, в кузове автомобиля или железнодорожных вагонах, при заполнении складов и силосов, при выгрузке из них зерна. Во время движения (встряхивания) легкие компоненты зерновой массы (легкие примеси, мелкие и щуплые зерна и др.) перемещаются в верхние слои, а тяжелые - в нижние, т.е. нарушается однородность состава партии зерна.

Во время загрузки силосов наблюдается наибольшее самосортирование. Этому способствует сопротивление, оказываемое воздухом движущимся частицам. Крупные, тяжелые зерна и другие частицы с большей плотностью подают в

силос вертикально и с большей скоростью, чем легкие. Они заполняют центральную часть силоса. Мелкие, битые, щуплые зерна и легкие примеси уносятся вихревыми потоками воздуха к стенам силоса или скатываются по поверхности конуса, образуемого зерновой массой.

В результате самосортирования качество зерна в различных частях силоса будет неодинаково: в центре силоса находится доброкачественное зерно с большей натурой (объемной массой), менее засоренное, чем около стен, где накапливаются легкие органические примеси, пыль, семена сорняков, щуплые, дробленые зерна, имеющие повышенную влажность. Выпуск зерновой массы из силосов не устраняет последствий самосортирования при заполнении. Характер истечения зерна из силосов не способствует перемешиванию зерна.

Таким образом, самосортирование зерновой массы явление нежелательное, нарушение однородности партии зерна в хранилище затрудняет правильную оценку его качества как в силосе, так и при отгрузке из него, а также способствует развитию различных физиологических и микробиологических процессов в тех местах насыпи, где сосредоточены компоненты с повышенной жизнедеятельностью

Хорошая сыпучесть зерновых масс имеет огромное практическое значение. Правильно используя данное свойство и применяя необходимые устройства и механизмы, полностью избегают затрат ручного труда. Зерновые массы можно легко перемещать при помощи норий, транспортеров и пневмотранспортных установок, загружать в различные транспортные средства (автомобили, вагоны, суда) и хранилища (бункера, склады, траншеи, силосы элеваторов). Наконец, они могут перемещаться самотеком. Это свойство используют при хранении, обработке зерновых масс и погрузочно-разгрузочных работах; на нем основана вся поточность процессов на элеваторах, мукомольных и крупяных заводах. Зерновая масса, поднятая норией на верхний этаж элеватора или мукомольного завода, самотеком спускается вниз, и по пути ее обрабатывают на различных машинах. При загрузке и выгрузке хранилищ также используют самотек.

Степень заполнения хранилища зерновой массой зависит от сыпучести: чем она больше, тем легче и лучше заполняется бункер. Сыпучесть учитывают и при статических расчетах хранилища (давление зерновой массы на пол, стены и другие конструкции). Сыпучесть зерновой массы характеризуют углом трения или углом естественного откоса. Угол трения - наименьший угол, при котором зерновая масса начинает скользить по какой-либо поверхности. При скольжении зерна по зерну его называют углом естественного откоса или углом ската. Кроме данных показателей, известны коэффициенты трения зерновой массы, перемещающейся по самотечным трубам и лоткам.

Наибольшей сыпучестью обладают массы, состоящие из семян шарообразной формы (горох, просо, люпин). Чем больше отклоняется форма зерен от шарообразной и чем более шероховата их поверхность, тем меньше сыпучесть. Примером может служить относительно малая сыпучесть зерновых масс риса, некоторых сортов овса, ячменя и др.

Угол естественного откоса образуется между горизонтальной поверхностью и поверхностью зерновой массы при ее свободном движении. Поверхность

зерновой массы при этом формируется при движении зерна, в основном, под действием силы тяжести.

Угол естественного откоса – это изображенный на рисунке 2.1 угол между диаметром основания и образующей конуса насыпи, получающегося при свободном падении зерновой массы на горизонтальную плоскость (таблица 2.1). [2]

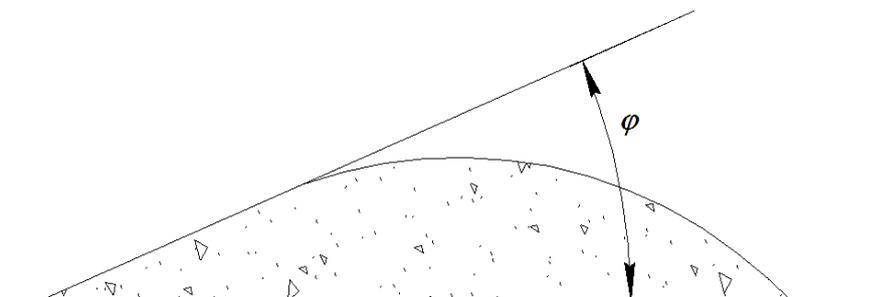


Рисунок 2.1 – Угол естественного откоса

При падении даже у шарообразных зерен вращения не наблюдается - зерна скользят вниз по образованной наклонной поверхности и перекатываются друг по другу. Угол φ , многократно определенный опытно в одном образце зерна, получается различным - на результат определения влияет, по-видимому, соотношение времени качения и времени скольжения зерен, зависящее от случайных обстоятельств опыта. Поэтому величина φ является среднестатистической.

Частицы, составляющие поверхность естественного откоса, находятся в состоянии предельного равновесия и удерживаются благодаря внутреннему трению, трению частицы по частице. Чем больше трение, тем больше откос, в котором могут удерживаться частицы, тем больше угол внутреннего трения и меньше сыпучесть материала.

Таблица 2.1 - Угол естественного откоса зерновых масс

Культура	Угол естественного откоса, град
Пшеница	23-38
Рожь	23-38
Тритикале	27-31
Просо	20-27
Горох	24-31
Соя	25-32
Ячмень	28-45
Кукуруза	30-40
Семена подсолнечника	31-45
Рис	27-48
Овес	31-54

Сыпучесть зерновой массы зависит от многих факторов. Основными из них являются: характеристика зерна (форма и размеры зерен, состояние их поверхности, характер примесей и их видовой состав), материал, форма и состояние поверхности, по которой самотеком перемещают зерновую массу. Наибольшей сыпучестью обладает зерно шарообразной (и близкой к ней) формы с гладкой поверхностью - горох, просо, сорго, люпин.

Сыпучесть зерновой массы значительно ухудшается при повышении влажности, засоренности, слеживаемости, самосогревании зерна. Снижение сыпучести - один из признаков неблагополучия с сохранностью зерновой массы. В таблице 2.2 приведено изменение угла естественного откоса при различной влажности зерновых культур.

Таблица 2.2 - Изменение угла естественного откоса зерновой массы в зависимости от культуры и влажности зерна

Культура	Влажность зерна, %	Угол естественного откоса, град
Пшеница	15,3	30,0
	22,1	35,0
Рожь	11,1	23,0
	17,8	34,0
Ячмень	11,9	28,0
	17,8	32,0
Овес	14,6	32,0
	20,7	41,0
Горох	13,0	27,0
	35,0	31,5

2.2 Методы определения угла естественного откоса зерновой массы

Метод высыпания зерна из бункера. Бункер с зерном располагают под горизонтальной поверхностью на высоте 0,75 – 1,00 м. Открывают задвижку и высыпают зерно через отверстие диаметром 20 мм. На горизонтальной поверхности формируется при этом насыпь зерна в виде конуса.

Угол естественного откоса при этом есть угол между диаметром основания и образующей конуса. Для измерения угла естественного откоса используют транспортер с отвесом.

Метод свободного расположения зерновой массы в сосуде с прозрачной стенкой. Сосуд заполняют на 1/3 зерном и медленно без толчков переворачивают на 90 градусов. При этом зерно в сосуде пересыпается и располагается под углом к основанию сосуда. Величину угла естественного откоса можно определить приложив транспортер к прозрачной стенке сосуда или замерив катеты прямоугольного треугольника, образованного стенками сосуда и видимой поверхностью зер-

новой насыпи.

Метод высыпания зерновой массы из ящика с выдвижной стенкой. Деревянный ящик с выдвижной стенкой заполняют зерном. Ставят на горизонтальную поверхность так, чтобы выдвижную стенку можно было поднять вверх. При плавном подъеме стенки зерно, высыпаясь из ящика, расположится под углом естественного откоса. Угол измеряется транспортиром с отвесом.

Метод осыпания зерновой массы с диска. Диск со стержнем в центре, находится в цилиндрическом сосуде засыпается зерном. При медленном (без рывков) подъеме диска зерно с него осыпается, образуя конус. Высота конуса определяется по шкале, нанесенной на стержень. Зная радиус диска, расчетным путем определяют угол естественного откоса зернового материала.

2.3 Порядок выполнения работы

1. Определить угол естественного откоса несколькими методами. Результаты занести в таблицу 2.3
2. Определить в исследуемых образцах содержание зерновой и сорной примеси.
3. Провести статистический анализ экспериментальных данных.
4. Сделать вывод о влиянии качества зерна на величину угла естественного откоса (засоренность, влажность).
5. Сравнить результаты различных способов определения угла естественного откоса.

Таблица 2.3

Метод определения	Культура	Влажность%	Содержание примеси, %		Угол естественного откоса					Среднее значение
			сорн.	зернов	1	2	3	4	5	

2.4 Вопросы для контроля

1. Что из себя представляет зерновая масса?
2. Отличительные особенности зерновой массы.
3. Чем характеризуется сыпучесть зерновой массы?
4. Что такое угол естественного откоса?
5. Методы определения угла естественного откоса?

3 Лабораторная работа №3 Определение коэффициентов внутреннего и внешнего трения зерна

Цель работы: Изучить физические параметры зерна, как сыпучего материала, научиться практически определять коэффициенты внутреннего и внешнего трения зерновой массы.

3.1 Общие положения

Сыпучесть и самосортирование зерновых масс. Способность зерна и зерновой массы перемещаться по какой-либо поверхности, расположенной под некоторым углом к горизонту, называют сыпучестью. Зерновая масса обладает хорошей сыпучестью, что используют при перемещении зерна конвейерами, нориями и другими средствами, при загрузке зерна в бункера, силосы и выпуске из них самотеком. Сыпучесть зерновой массы определяет минимальный угол наклона бункеров и силосов на элеваторах, мукомольных, крупяных, комбикормовых заводах, ее учитывают при расчетах зернохранилищ на прочность и т.д.

Сыпучесть зерновой массы характеризуют углом естественного откоса, т.е. углом между диаметром основания и образующей конуса, получающегося при свободном падении зерновой массы на горизонтальную плоскость. На сыпучесть зерновой массы влияют многие факторы: гранулометрический состав и гранулометрическая характеристика (форма, размеры, характер и состояние поверхности зерен), влажность, количество примесей и их видовой состав, материал, форма и состояние поверхности самотечной трубы.

Наиболее сыпучи зерновые партии, состоящие из семян шарообразной формы с гладкой поверхностью (просо, горох, соя). При отклонении от этой формы сыпучесть зерна ухудшается. Зерна продолговатые, тонкие, с шероховатыми оболочками или цветковыми пленками обладают меньшей сыпучестью. Примеси, особенно легкие и мелкие или имеющие шероховатую поверхность, снижают сыпучесть зерновой массы. Увеличение влажности зерновой массы приводит к снижению сыпучести и увеличению угла естественного откоса. Сыпучесть зерновой массы снижается при хранении вследствие уплотнения и служит косвенным показателем состояния хранящегося зерна.

Самосортирование возникает при перемещении, встряхивании и движении зерновой массы на конвейерах, в кузове автомобиля или железнодорожных вагонах, при заполнении складов и силосов, при выгрузке из них зерна. Во время движения (встряхивания) легкие компоненты зерновой массы (легкие примеси, мелкие и щуплые зерна и др.) перемещаются в верхние слои, а тяжелые - в нижние, т.е. нарушается однородность состава партии зерна.

Во время загрузки силосов наблюдается наибольшее самосортирование. Этому способствует сопротивление, оказываемое воздухом движущимся части-

цам. Крупные, тяжелые зерна и другие частицы с большей плотностью подают в силос вертикально и с большей скоростью, чем легкие. Они заполняют центральную часть силоса. Мелкие, битые, щуплые зерна и легкие примеси уносятся вихревыми потоками воздуха к стенам силоса или скатываются по поверхности конуса, образуемого зерновой массой.

В результате самосортирования качество зерна в различных частях силоса будет неодинаково: в центре силоса находится доброкачественное зерно с большей натурой (объемной массой), менее засоренное, чем около стен, где накапливаются легкие органические примеси, пыль, семена сорняков, щуплые, дробленые зерна, имеющие повышенную влажность. Выпуск зерновой массы из силосов не устраняет последствий самосортирования при заполнении. Характер истечения зерна из силосов не способствует перемешиванию зерна.

Таким образом, самосортирование зерновой массы явление нежелательное, нарушение однородности партии зерна в хранилище затрудняет правильную оценку его качества как в силосе, так и при отгрузке из него, а также способствует развитию различных физиологических и микробиологических процессов в тех местах насыпи, где сосредоточены компоненты с повышенной жизнедеятельностью.

Фрикционные связи. Такие связи на поверхности частиц определяются характером поверхности частиц, их размерами и т.д. В зависимости от характера этих связей условимся подразделять сыпучие материалы на идеальные и связанные.

Под идеальными сыпучими материалами понимают такие, у которых между частицами твердого тела существуют только связи трения и одностороннего сжатия, действующие в плоскости элементарных контактных площадок (зерно, сухой песок, гравий, щебень). Силами сцепления в сыпучем материале ввиду их малости без большой погрешности пренебрегают.

Под связанными понимают такие сыпучие материалы, у которых связи между частицами твердого тела определяются силами трения и сцепления, действующими на одних и тех же плоскостях контактов (мука, цемент).

Из принятого определения связи для идеальных сыпучих материалов характеризуются коэффициентом внутреннего трения, а для связанных - коэффициентом внутреннего трения и коэффициентом сцепления.

Фрикционные свойства. Характер передачи энергии в сыпучем материале в значительной степени определяется силами трения и сцепления на контактах его частиц. Эти же силы определяют поведение сыпучего материала в надкритическом состоянии, когда плотность укладки изменяется от некоторого критического значения $k_{кр}$ до минимального k_{min} . Эти свойства сыпучего материала условно можно назвать фрикционными. Они определяются углом естественного откоса (угол внутреннего трения на поверхности сыпучего материала), коэффициентом сопротивления сдвига одного слоя сыпучего материала по другому, коэффициентом сопротивления сдвига сыпучего материала по ограждающей поверхности. Последние два коэффициента - комплексные величины.

Для каждого конкретного сыпучего материала при определенных условиях фрикционные свойства можно расчленить на величины предельного сопротивления сдвига (слоя по слою, слоя по стенке), коэффициенты трения (внутреннего, внешнего), величины сопротивления разрыва (внутри слоя, слоя от стенки).

Для случая зернистых материалов (зерно злаков) сыпучий материал может считаться идеальным, для которого сцепление между частицами мало и может быть опущено. Между его частицами и между частицами и стенками сосуда существуют только связи трения.

Трение в сыпучем материале - явление комплексное и определяется, с одной стороны, трением по контактными поверхностям частиц материала, с другой - связано с перестройкой структуры сыпучего материала, происходящей в результате упругой деформации частиц твердой фазы и остаточной деформации (изменение плотности укладки частиц).

Наиболее полно процесс трения в сыпучем материале проявляется при внутреннем трении, когда в процесс вовлекается слой сыпучего материала и поверхность сдвига как таковая отсутствует.

При внешнем трении, которое возникает при относительном смещении сыпучего материала по стенкам сосуда, трение обусловлено процессами в пограничном слое.

Характер передачи энергии в сыпучем материале в значительной степени определяется силами трения и сцепления на контактах его частиц. Эти же силы определяют поведение сыпучего материала в надкритическом состоянии, когда плотность укладки изменяется от некоторого критического значения $k_{кр}$ до минимального k_{min} . Эти свойства сыпучего материала условно можно назвать фрикционными. Они определяются углом естественного откоса (угол внутреннего трения на поверхности сыпучего материала), коэффициентом сопротивления сдвигу одного слоя сыпучего материала по другому, коэффициентом сопротивления сдвигу сыпучего материала по ограждающей поверхности. Последние два коэффициента - комплексные величины.

Для каждого конкретного сыпучего материала при определенных условиях фрикционные свойства можно расчленить на величины предельного сопротивления сдвигу (слоя по слою, слоя по стенке), коэффициенты трения (внутреннего, внешнего), величины сопротивления разрыву (внутри слоя, слоя от стенки).

Для случая зернистых материалов (зерно злаков) сыпучий материал может считаться идеальным, для которого сцепление между частицами мало и может быть опущено. Между его частицами и между частицами и стенками сосуда существуют только связи трения.

Трение в сыпучем материале - явление комплексное и определяется, с одной стороны, трением по контактными поверхностям частиц материала, с другой - связано с перестройкой структуры сыпучего материала, происходящей в результате упругой деформации частиц твердой фазы и остаточной деформации (изменение плотности укладки частиц).

Наиболее полно процесс трения в сыпучем материале проявляется при внутреннем трении, когда в процесс вовлекается слой сыпучего материала и поверхность сдвига как таковая отсутствует.

При внешнем трении, которое возникает при относительном смещении сыпучего материала по стенкам сосуда, трение обусловлено процессами в пограничном слое.

Внутреннее трение. Даже для идеального сыпучего материала оно носит сложный комплексный характер. Происходя в слое сыпучего материала, трение определяется площадями фактических контактов, их числом, зависящим от плотности укладки, упругими свойствами частиц твердой фазы, размерами и формой частиц, состоянием их поверхности и другими факторами.

Сложность процессов внутреннего трения в сыпучих материалах не позволяет раскрыть его качественную сторону и получить зависимости, количественно характеризующие процесс. Однако влияние ряда факторов доказано. В частности, на величину коэффициентов внутреннего трения оказывают влияние плотность укладки частиц и связанная с ней подвижность частиц.

Величина коэффициентов внутреннего трения изменяется от некоторых минимальных значений, которым отвечает наибольшая подвижность частиц сыпучего материала, до максимального значения, соответствующего вырождению сыпучего материала, при котором подвижность частиц стремится к нулю, т.е.

$$f_{min} < f < f_{max}. \quad (3.1)$$

Этому требованию отвечают частицы, лежащие на поверхности сыпучего материала, для которых величина коэффициента внутреннего трения равна тангенсу угла естественного откоса, т.е. $f_{min} = tg \varphi$.

Максимальное значение коэффициента внутреннего трения отвечает максимальному значению коэффициента плотности укладки, при котором сыпучий материал как статистический ансамбль вырождается. При этом процесс трения в плоскости сдвига заменяется процессом среза твердой фазы.

Величина коэффициента внутреннего трения для зерна пшеницы может быть выражена уравнением

$$f = f_{min} + a \frac{k - k_{min}}{k_{max} - k}, \quad (3.2)$$

где k_{min} , k_{max} - соответственно минимально и максимально возможные значения коэффициентов плотности укладки частиц сыпучего материала;

a - постоянная;

f_{min} - минимальное значение коэффициента внутреннего трения.

Так как плотность укладки по сечению потока, движущемуся в вертикальном цилиндрическом сосуде, изменяется с высотой слоя, то соответственно изменяется и коэффициент внутреннего трения.

Зависимость изменения величины коэффициента внутреннего трения потока пшеницы от высоты слоя зерна в силосе в первом приближении можно опи-

сать эмпирической формулой

$$f = f_{\min} + a_1 (1 - e^{-b_1 H}), \quad (3.3)$$

где a_1, b_1 - постоянные (для пшеницы $a_1 = 1,8, b_1 = 0,1$);
 H - высота слоя, м.

Величина f для сыпучих материалов приведена в таблице 3.1. Гранулометрический состав сыпучего материала заметно влияет на величину коэффициента внутреннего трения. Это объясняется тем, что с увеличением размера частиц увеличивается фактическая площадь контактов между ними. Одновременно с этим усиливается послойное зацепление между двумя соседними рядами частиц, но которым происходит сдвиг слоев сыпучего материала.

Таблица 3.1 - Величина коэффициента внутреннего трения пшеницы для различной глубины слоя

Глубина H слоя зерна, м	Величина коэффициента внутреннего трения f	Угол внутреннего трения φ , град	Глубина H слоя зерна, м	Величина коэффициента внутреннего трения f	Угол внутреннего трения φ , град
2	0,72	36	18	2,02	64
4	1,17	49	20	2,06	64,3
6	1,30	52	22	2,11	64,7
8	1,50	56	24	2,14	65
10	1,66	59	26	2,17	65,3
12	1,75	60	28	2,19	65,5
14	1,85	61,5	30	2,20	65,7
16	1,94	63	32	2,21	65,7

В сыпучем материале, состоящем из частиц разных размеров, величина коэффициента внутреннего трения изменяется по закону

$$f = \varphi d^n + \beta, \quad (3.4)$$

где φ, n, β - постоянные;
 d - диаметр частиц, мм.

Влажность сыпучего материала по-разному влияет на величину коэффициента внутреннего трения. Для зерна по мере увеличения влажности вначале отмечается линейное изменение коэффициента трения, что объясняется изменением размеров контактных площадок между частицами. При некоторой критической влажности зерна $\omega_{кр}$ (рисунок 3.1) происходит изменение механических свойств частиц, вследствие чего трение в контактах частиц заменяется срезом, сопротивление которому остается постоянным до некоторого предела изменения влажно-

сти частиц.

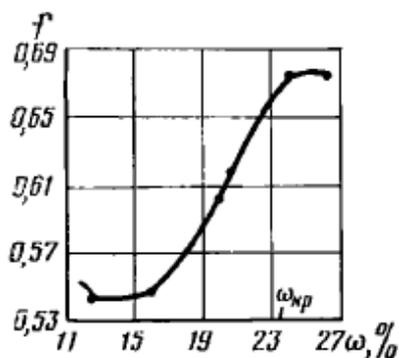


Рисунок 3.1 - Зависимость коэффициента внутреннего трения от влажности зерна пшеницы

Внешнее трение. Характеризует процесс сдвига сыпучего материала по ограждающей его поверхности. Сам по себе процесс сдвига - явление комплексное, и лишь очень приближенно его можно описать уравнением Амонта-Кулона.

Величина коэффициента сопротивления сдвигу непостоянна и зависит в основном от нормального давления сыпучего материала на ограждающую поверхность (рисунок 3.2). Это объясняется тем, что в процессе сдвига сыпучего материала в области, прилегающей к ограждающей поверхности, происходит с определенным затуханием послойная передача энергии упругих деформаций и количества движения от наружных слоев к внутренним.

При незначительных по величине сдвигающих усилиях, но способных преодолеть сил сопротивления на контактах частиц, сыпучий материал смещается по ограждающей поверхности в плоскости контактов частиц материала с поверхностью.

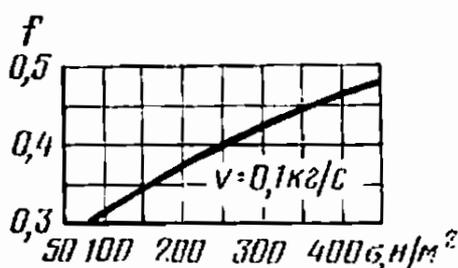


Рисунок 3.2 - Зависимость коэффициента внешнего трения от нормального давления (пшеница по стальной поверхности)

При увеличении сдвигающих усилий наступает момент, когда частицы сыпучего материала, лежащие в пристенном слое, под действием тангенциальных сил изменяют свое положение. Начинается процесс вырождения: вначале в пристенном слое, затем он охватывает более глубокие слои.[3]

3.2 Практическое определение коэффициентов внешнего и внутреннего трения

Угол внутреннего трения для частиц, лежащих на поверхности естественного откоса, численно равен углу естественного откоса.

Угол внутреннего трения увеличивается с увеличением глубины, на которой находится слой зерна в насыпи, что связано с увеличением плотности укладки частиц и, соответственно, уменьшением их подвижности.

Величина трения зависит от степени шероховатости взаимодействующих поверхностей и от их формы. Если бы поверхность скольжения частиц по частицам была плоской, угол внутреннего трения был бы значительно меньше фактического. В действительности при движении зерновой массы трение частиц увеличивается за счет того, что подвижные частицы попадают в углубления между неподвижными.

Определим значение коэффициента внутреннего трения μ .

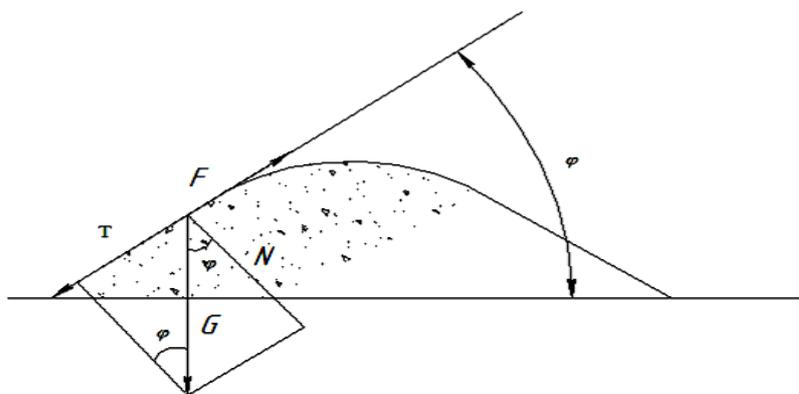


Рисунок 3.3 – Схема для определения коэффициента внутреннего трения

Допустим, что на поверхности естественного откоса (рисунок 3.3) лежит частица весом (массой) G . Разложим вес на составляющие: N - нормальную и T - касательную к поверхности $N = G \cos \varphi$; $T = G \sin \varphi$. Силе T , стремящейся переместить частицу вниз по откосу, препятствует сила внутреннего трения F . В состоянии предельного равновесия $F = T$.

Коэффициент внутреннего трения из приближенного уравнения силы трения численно равен тангенсу угла внутреннего трения.

$$F = \mu N,$$

(3.5)

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{T}{N} = \frac{G \sin \varphi}{G \cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Трение частиц сыпучего материала по ограждающей поверхности называется внешним.

Углом внешнего трения является наименьший угол φ_0 (рисунок 3.4), при котором сыпучий материал (зерно) под влиянием силы тяжести начинает самопроизвольно двигаться по наклонной поверхности пластины, изготовленной из того же материала, что и стена. Зерновая масса передвигается под действием небольших сдвигающих усилий (одной из составляющих силы тяжести), которые не могут преодолеть внутреннего трения. Так как частицы одна по отношению к другой не смещаются и трение сдвига зерна по ограждающей поверхности меньше, чем зерна по зерну, то угол внешнего трения меньше угла внутреннего трения ($\varphi_0 < \varphi$).

Коэффициент внешнего трения f_0 , аналогично предыдущему, равен тангенсу угла внешнего трения

$$f_0 = \operatorname{tg} \varphi_0; \varphi_0 < \mu. \quad (3.6)$$

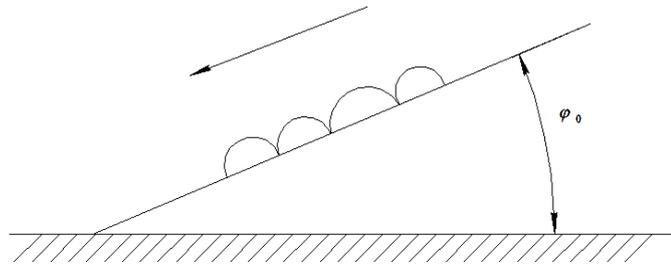


Рисунок 3.4 - Схема для определения коэффициента внешнего трения

Для сухого зерна пшеницы, сдвигаемого по бетону или стали, среднее значение $\varphi_0 = 22^\circ$, $f_0 = 0,4$.

3.3 Порядок выполнения работы

1) Определить коэффициенты внешнего и внутреннего трения зерна различных культур по разным материалам.

2) Исследовать зависимость коэффициента внешнего трения от влажности для зерна пшеницы.

Результаты определений и расчетов внести в таблицу 3.1 и таблицу 3.2.

Таблица 3.1 - Значение коэффициента внешнего трения зерна по различным материалам

Культура	Материал	Повторность					Среднее значение	Средне-квадратическая ошибка
		1	2	3	4	5		

Таблица 3.2 - Значение коэффициента внешнего трения пшеницы по различным материалам в зависимости от влажности

Материал	Влажность W, %	Повторность					Среднее значение	Средне-квадратическая ошибка
		1	2	3	4	5		

Эксперименты ставятся в пяти повторностях.

Статистическая обработка заключается в выбраковывании недостоверных значений. Для этого подсчитываем дисперсию по формуле 3.7

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}{n-1}. \quad (3.7)$$

Определяем средне-кадратическую ошибку по формуле 3.8

$$S = \sqrt{S^2}. \quad (3.8)$$

Если отклонение опыта $(X_i - X_{cp}) < S$ - результат выбраковываем и определяем среднее значение по оставшимся данным.

3.4 Вопросы для контроля

1. Что такое сыпучесть?
2. Когда наблюдается самосортирование зерновых масс?
3. Чему численно равен коэффициент внутреннего трения?
4. Чему численно равен коэффициент внешнего трения?

4 Лабораторная работа №4 Истечение сыпучего материала

Цель работы: Изучение закономерности свободного истечения зерна через отверстия различной формы и размеров

4.1 Общие положения

Механизм передачи усилий в сыпучем материале. Рассмотрим механизм передачи усилий в сыпучем материале при соотношениях $\frac{H}{b} < 1$ (рисунок 4.1).

Сосуд со стенкой AB длиной 1 м ограждает сыпучий материал. Если придать стенке перемещение δ в горизонтальном направлении влево, то произойдет движение некоторого объема ABC сыпучего материала по плоскости обрушения AC , находящейся под углом обрушения Θ с горизонталью.

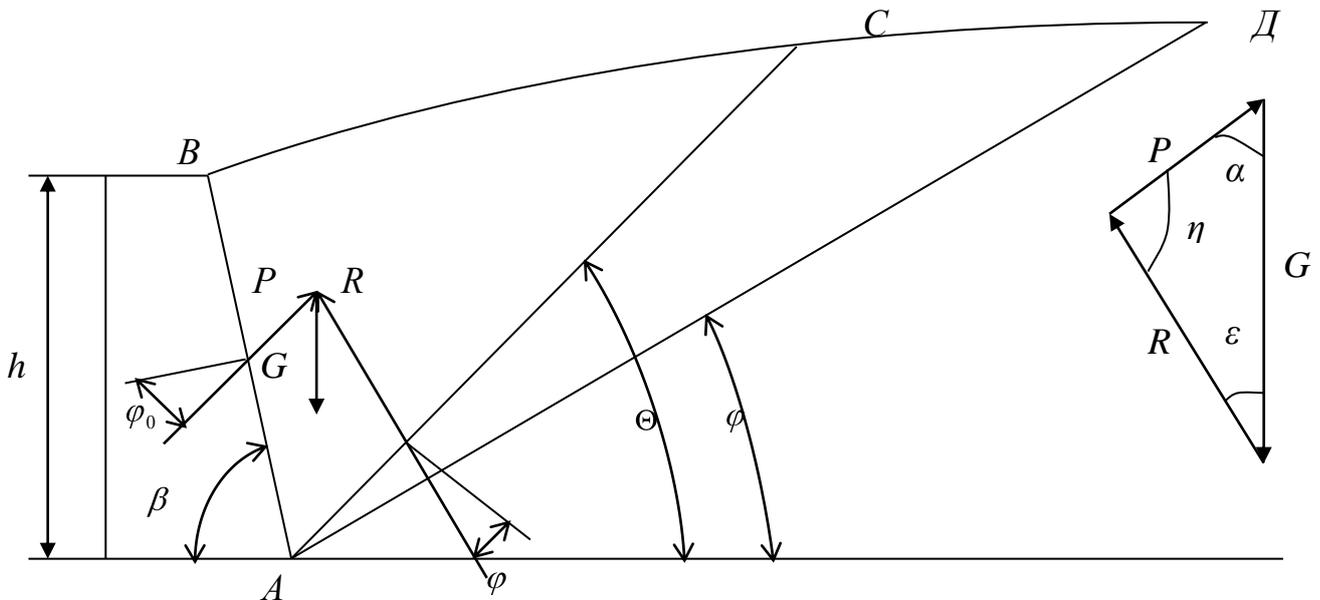


Рисунок 4.1 – Механизм передачи усилий в сыпучем материале при соотношениях $\frac{H}{b} < 1$

Призму ABC будем рассматривать в состоянии предельного равновесия. Такое предположение позволяет определить направление реакций со стороны стены и плоскости обрушения.

Проведем под углом внутреннего трения φ линию естественного откоса AD . Вес призмы обрушения длиной 1 м обозначим G :

$$G = S_{ABC} \cdot l \cdot \gamma, \quad (4.1)$$

где γ - объемный вес сыпучего материала.

Вес призмы обрушения уравнивается реакцией опоры P и реакцией сыпучего материала R со стороны плоскости обрушения.

Реакция P составит с нормалью к плоскости AB угол φ_0 (угол внешнего трения), а R с нормалью к плоскости AC – угол φ (внутреннего трения).

Направление силы P с вертикалью образует угол α :

$$\alpha = \beta - \varphi_0. \quad (4.2)$$

Угол между направлением силы R и вертикалью равен:

$$\varepsilon = \theta - \varphi. \quad (4.3)$$

Угол между направлением сил P и R :

$$\eta = \Pi - \alpha + \varepsilon. \quad (4.4)$$

Из силового треугольника на основании теоремы синусов получим:

$$\frac{P}{G} = \frac{\sin \varepsilon}{\sin \eta} = \frac{\sin \theta - \varphi}{\sin \Pi - \beta - \varphi_0 + \theta - \varphi}. \quad (4.5)$$

$$P = G \frac{\sin \theta - \varphi}{\sin \beta + \theta - \varphi_0 - \varphi}. \quad (4.6)$$

По уравнению (4.6) находится сила давления сыпучего материала на стенку. Давление на дно сосуда в этом случае может быть принято равным весу сыпучего материала, засыпанного в сосуд.

При засыпке материала в глубокий сосуд $\frac{H}{b} > 1$ в зависимости от способа подачи материала и высоты слоя, степень вырождения статического ансамбля увеличивается с коэффициентом плотности укладки. Вследствие этого сыпучий материал, находящийся в покое, приобретает свойства твердого тела, проявляющиеся в способности его слоев передавать горизонтальные давления под действием вертикальных нагрузок (распор). В общем виде для этого случая зависимость между горизонтальными $P(r,z)$ и вертикальными $q(r,z)$ давлениями можно описать уравнением

$$q_{r,z} = \psi(z) \cdot p_{r,z}, \quad (4.7)$$

где r – радиус сосуда;

z – высота слоя;

$$\psi(z) = \frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} \text{ - коэффициент бокового распора.}$$

Для практического применения при вертикальной стенке ($\beta = 90^\circ$) и горизонтальной поверхности сыпучего материала величину наибольшего давления на стенку сосуда единичной длины находят по следующей формуле (взамен формулы (4.6)):

$$P_0 = \frac{1}{2} \gamma h^2 \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (4.8)$$

где γ - объемная масса сыпучего материала, кг/м³;

h - высота насыпи у стенки, м.

Для насыпи, отсыпанной у стенки под углом естественного откоса φ

$$P_0 = \frac{1}{2} \gamma h^2 \frac{\cos^2 \varphi}{\cos \varphi_0}. \quad (4.9)$$

При отношении размеров сосуда $\frac{H}{b} \gg 1$ вертикальное q и горизонтальное P давление определяют по обобщенным формулам Янсена:

$$g = \frac{j \cdot R_z}{f_0 n} \left(1 - e^{-f_0 a R_z} \right). \quad (4.10)$$

$$P = \frac{j \cdot R_z}{f_0} \left(1 - e^{-f_0 a R_z} \right), \quad (4.11)$$

где R_z – гидравлический радиус, м;

f_0 – коэффициент внешнего трения;

$n = \psi(z)$;

$a = \frac{z}{R_r}$ – коэффициент глубины.

Существуют две формы истечения сыпучего материала из отверстий в емкостях. Для первой характерно одновременное движение всего объема материала; в другом случае сыпучий материал движется только в центральной части емкости. Первая форма истечения называется гидравлической, вторая – «нормальной».

При гидравлической форме граничные частицы потока скользят по стенкам емкости, форма горизонтальных слоев материала почти не искажается.

Нормальное истечение, когда сыпучий материал движется только в центральной части емкости (рисунок 4.2), характерно образованием воронки на поверхности материала.

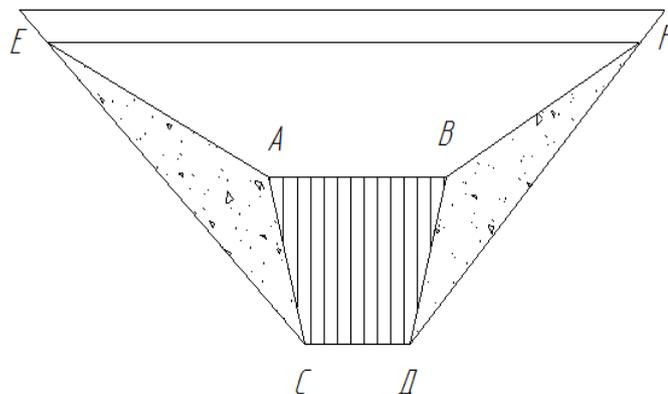


Рисунок 4.2 – Схема движения зерна

В центральной части емкости проходит конусообразный движущийся поток – прямой круговой «конус истечения» $ABDC$. Часть сыпучего материала, прилегающая к стенкам (ACE , BDF), остается неподвижной.

По мере опускания площадки AB частицы из застойных зон скатываются по линиям естественного откоса EA , FB и попадают в зону истечения. Высота конуса в зависимости от высоты слоя материала уменьшается, но угол истечения (между вертикальной осью потока и образующей конуса) остается неизменным; поток движется в «трубе», образованной неподвижными частицами самого материала.

Динамическое давление, которое оказывает движущийся поток на стенки емкости, различно и зависит прежде всего от формы истечения: при нормальном истечении, когда одновременно движется сравнительно небольшая масса материала и давление потока частично гасится внутренним трением прилегающих к стенке неподвижных частиц, динамическое давление значительно меньше, чем при гидравлической форме истечения.

В свою очередь форма истечения определяется тем, приходят ли в движение с началом истечения частицы материала, соприкасающиеся со стенками емкости. Если частицы могут скользить по стенкам выпускной воронки, в движение одновременно приходит вся масса сыпучего материала в емкости; истечение приобретает гидравлическую форму. Если прилегающие к стенкам емкости вблизи выпускного отверстия частицы тормозятся, они не только остаются в покое, но и вызывают торможение смежных слоев; вытекающая из отверстия струя получает форму конуса, расположенного внутри емкости; истечение будет нормальным.

Таким образом, возможность скольжения частиц по внутренней поверхности стенок емкости имеет принципиальное значение, так как определяет вид истечения и, следовательно, величину сил, действующих на стенки и дно сосуда.

Для абсолютно гладких шаров при движении в сторону сужения выпускной воронки может наступить «самоторможение». Взаимное расположение шаров для этого случая и схема действующих сил приведены на рисунке 4.3.

Осевое усилие P (сила тяжести расположенных выше слоев, приходящаяся на шар 1) вызывает воздействие на шар 2 силы R_1 , направленной под углом β к оси X . R_2 - реакция стенки на шар 2, направленная по нормали к стенке (так как

шар абсолютно гладкий), равна по абсолютной величине R_1 и направлена противоположно.

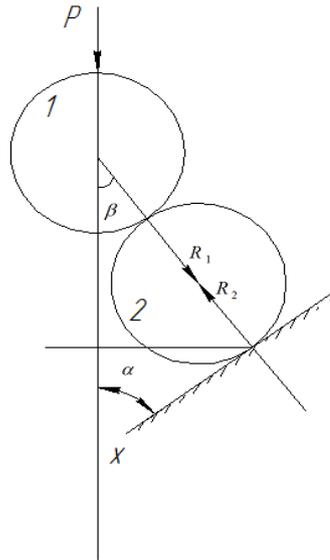


Рисунок 4.3 – Схема сил при явлении самоторможения частиц

Равнодействующая этих сил равна нулю; независимо от величины силы P шар 2 останется в покое.

Условие самоторможения прилегающей к стенке абсолютно гладкой частицы $\alpha + \beta > 90^\circ$.

В центральной части емкости сыпучий материал будет двигаться.

Прилегающие к стенке частицы не смогут двигаться и в случае $\alpha + \beta > 90^\circ$ (рисунок 4.4), когда направление R (равнодействующей сил R_1 и R_2) противоположно направлению потока; шар 2 стремится сдвинуться в направлении, обратном силе P .

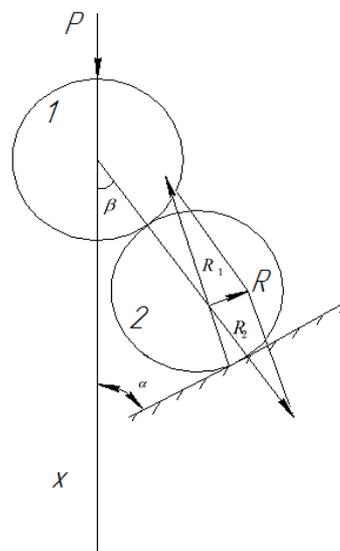


Рисунок 4.4 – Схема сил при явлении самоторможения частиц

Прилегающие к стенке емкости абсолютно гладкие шары придут в движение при условии $\alpha + \beta > 90^\circ$ (рисунок 4.5), когда под действием силы P шар будет выталкиваться в направлении действия силы. Только в этом случае истечение сыпучего материала из емкости будет гидравлическим.

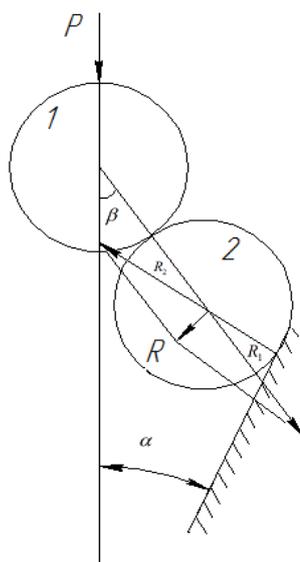


Рисунок 4.5 – Схема сил при гидравлической форме истечения

В результате этого сила взаимодействия между шарами R_1 отклоняется от общей нормали к шарам на угол внутреннего трения φ в сторону возрастания угла β , а реакция стенки R_2 , равная R_1 , отклоняется от нормали к стенке на угол φ_0 внешнего трения в сторону возрастания угла α . В итоге сила R_1 составляет с осью емкости угол $(\beta + \alpha)$, а сила R_2 составляет с нормалью к оси емкости угол $\alpha + \varphi_0$. По аналогии о рассмотрении условия торможения шероховатых шаров

$$\alpha + \varphi_0 + \beta + \varphi \geq 90^\circ . \quad (4.12)$$

Скольжение частиц по стенке выпускной воронки возможно при условии

$$\alpha + \varphi_0 + \beta + \varphi < 90^\circ . \quad (4.13)$$

Шероховатые шары (рисунок 4.6), перемещаясь в емкости, вклиниваются между шарами смежных слоев, раздвигают их.

Угол внешнего трения φ_0 , угол укладки β и угол естественного откоса φ сухого зерна колеблются в сравнительно небольших пределах; вопрос о форме истечения решает, по существу, величина α - угол наклона стенок выпускной воронки к вертикальной оси емкости.

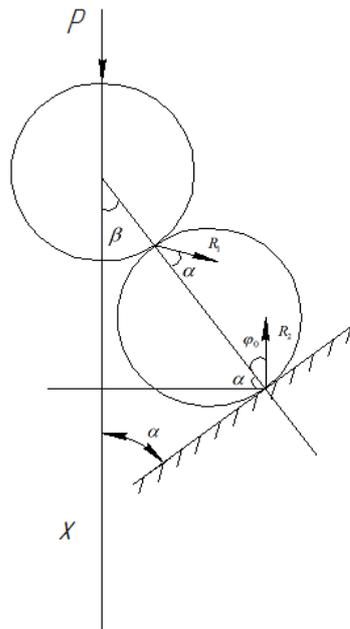


Рисунок 4.6 – Схема сил шероховатых шаров

Подставив в неравенство средние величины углов для сухого зерна, получим значение α , при котором истечение примет гидравлическую форму:

$$\alpha < 90 - \varphi_0 - \beta - \varphi < 90^\circ - 22^\circ - 23^\circ - 32^\circ < 13^\circ. \quad (4.14)$$

Угол α у пирамидальных и конусных выпускных воронок бункеров и силосов значительно больше 13° , что обеспечивает нормальную форму истечения зерновой массы и как следствие этого - меньшее динамическое давление потока зерна на стены и дно емкости.[3]

Процесс истечения сыпучего материала из емкости характеризуется величиной расхода. Определяющую роль играют параметры отверстия истечения при прочих равных условиях.

Величину расхода (производительности истечения) определяют по формуле 4.15 или по формуле 4.16

$$Q = 3600 \cdot B \cdot R_2 \cdot F \cdot \gamma. \quad (4.15)$$

$$Q = 3,6 \frac{G}{\tau}, \quad (4.16)$$

где B - постоянная (для пшеницы $B = 25$);

R_2 - гидравлический радиус отверстия истечения, м;

F - площадь отверстия истечения, м²;

γ - объемная масса зерна, кг/м³;

G - масса зерна, кг;

τ - время истечения, с.

4.2 Порядок выполнения работы

В результате выполнения работы: необходимо установить зависимость производительности истечения от размеров отверстия истечения, выявить влияние формы отверстия на производительность истечения, рассчитать значение постоянной B в формуле 4.15 для отверстий различных размеров и формы, а также для зерна различных культур. Работу выполняют подгруппы из 3-4 человек.

Для этого: бункер заполняется зерном данной культуры, открывается задвижка. Через некоторое время (3-5 с) под струю сыпучего материала ставят емкость для отбора образца.

Время отбора, образца определяют секундомером. Массу образца устанавливают на лабораторных весах.

Отбор образцов при истечении из каждого отверстия проводят в трехкратной повторности, результаты заносят в протокол опыта (таблица 4.1), а затем определяют среднее значение производительности истечения - Q и рассчитывают постоянную B для данного отверстия:

1. Результаты экспериментов оформляют в виде графиков.

2. Зависимость производительности истечения от параметров истечения:
 $Q = f(a, d, F, R_2)$.

3. Зависимость коэффициента B от параметров отверстия истечения:
 $B = f(a, d, F, R_2)$.

Таблица 4.1 - Протокол опытов

Культура и ее объёмная масса, кг/м ³	Параметры отверстия истечения					Повтор опыта	Измеряемые величины		Расчетные величины		Среднее значение	
	круг d , м	квад. a , м	R_2 , м	F , м	$R_2 \cdot F$, м ³		τ , с	G , кг	Q , кг/с	B	Q , кг/с	B

4.3 Вопросы для контроля

1. В чем сущность механизма передачи усилий в сыпучем материале?
2. Чем уравнивается вес призмы обрушения?
3. Формы истечения сыпучего материала из отверстий в емкостях?
4. В каком случае наступает «самоторможение» абсолютно гладких шаров при движении в сторону сужения выпускной воронки?
5. В каком случае истечение сыпучего материала из емкости будет гидравлическим?
6. Условие скольжения частиц по стенке выпускной воронки?

5 Лабораторная работа №5 Влияние плотности укладки сыпучего материала на производительность истечения

Цель работы: Установить зависимость производительности истечения сыпучего материала от плотности укладки частиц

5.1 Общие положения

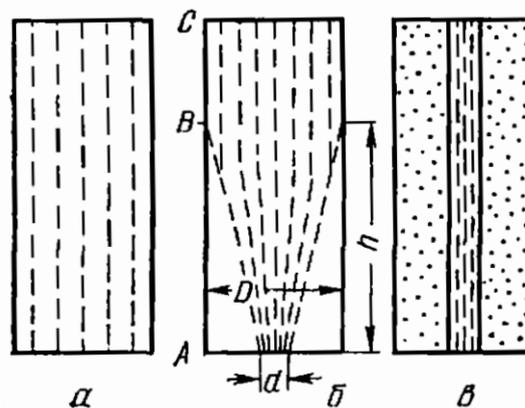
Движение потока сыпучих материалов. Под потоком сыпучего материала понимают такую совокупность частиц, при которой движущиеся частицы твердого тела не теряют контакта между собой.

Движение потока сыпучих материалов подразделяют на следующие виды:

- движение по наклонным трубам и каналам с неполным заполнением площади поперечного сечения;
- движение по наклонным и вертикальным трубам и сосудам с заполнением площади поперечного сечения;
- истечение сыпучих материалов из отверстий, расположенных в дне или боковой стенке сосуда (бункера или силоса).

Существует две формы движения «связанная» и «несвязанная».

Движение потока сыпучего материала, при котором связи, наложенные на частицы, удерживают их в покое относительно друг друга и градиент скорости потока по поперечному сечению равен нулю, является связанной формой (рисунок 5.1).



a - по всей высоте потока; *б* - в верхней части потока; *в* - в центральной части потока.

Рисунок 5.1 – Виды связанной формы движения потока сыпучих материалов

На границе двух форм движения потока (рисунок 5.1б) сводная структура, характерная для связанной формы, обладает максимальной несущей способностью, которая нарушается при переходе в несвязанную форму. Возникновение и разрушение такой структуры в силу дискретной природы сыпучего материала происходит дискретно. Следовательно, движение потока на этом участке сопровождается пульсацией.

Связанная форма движения потока сыпучего материала в его центральной части наблюдается при граничных условиях, когда поверхности трения на границе потока перемещены в поток материала. В частности, это явление можно наблюдать при ребристых стенах сосуда.

Неразрывность потока сыпучего материала определяется:

1) минимальным размером D сосуда:

$$D \geq ae^{b\delta}, \quad (5.1)$$

где a, b - постоянные ($a = 4,5-5, b = 0,22-0,25$);

δ - наибольший размер частицы сыпучего материала, мм.

2) максимально допустимой скоростью его движения:

$$V \leq B\sqrt{R_2}, \quad (5.2)$$

где B - постоянная, зависящая от свойств материала;

R_2 - гидравлический радиус сосуда, м.

При введении в поток различных конструктивных элементов разрыв потока не произойдет при соблюдении условий.

$$\frac{F}{F_0} > 20; \frac{F}{F_T} > 20, \quad (5.3)$$

где F_0 - площадь миделевого сечения введенных в поток конструктивных элементов;

F_T - площадь миделевого сечения частицы сыпучего материала;

F - площадь сечения потока.

Включение в поток конструктивных элементов в виде плоскости не вызывает разрыва потока, если угол наклона плоскости не вызывает разрыва потока, если угол наклона плоскости к горизонту удовлетворяет условию

$$\alpha > \varphi_{max}, \quad (5.4)$$

где φ_{max} - угол внутреннего трения в потоке на глубине установки плоскости.

При обтекании потоком конструктивных элементов изменяется структура потока сыпучего материала из-за изменения укладки частиц, и неизбежно при этом нарушаются связи трения в их контактах. Процесс перестройки структуры

потока носит пульсирующий характер.

Истечение сыпучего материала из сосуда. Процесс истечения сыпучего материала из отверстий сосудов характеризуется величиной расхода, которая не зависит от высоты слоя сыпучего материала, засыпанного в сосуд.

В сосуде у выпускного отверстия создаются условия для образования своеобразного свода из сыпучего материала. Образовавшийся свод может принять устойчивую форму (продукт не высыпается) или неустойчивую (динамический свод).

Скорость истечения сыпучего материала в плоскости выпускного отверстия зависит от высоты свода, так как в подсводном пространстве частицы, покинувшие свод, движутся под действием силы тяжести с высоты, равной высоте свода. Высота свода функция механических свойств материала и характерного размера выпускного отверстия, и только от них зависит величина расхода сыпучего материала.

Максимальный размер отверстия, при котором образуются устойчивые своды, зависит от физических свойств сыпучего материала и характерного размера частиц твердого тела.

Процесс истечения сыпучего материала при образовании динамического свода (рисунок 5.2) можно рассматривать как свободное падение частиц с высоты z_0 .

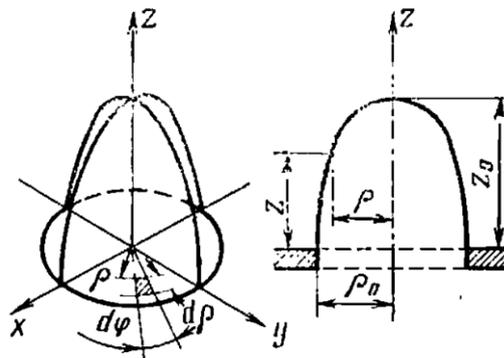


Рисунок 5.2 - Процесс истечения сыпучего материала при образовании динамического свода

Уравнение элементарного расхода сыпучего материала можно записать в виде

$$dg = dF \sqrt{2gz} , \quad (5.5)$$

где $dF = r \cdot dr \cdot d\varphi$ - элементарная площадка выпускного отверстия;

$$z = z_0 \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) - \text{высота динамического свода.}$$

Подставив в уравнение (5.5) значения dF и z и проинтегрировав, формула расхода запишется в виде

$$g = \frac{2}{3} F = \sqrt{2gz_0}. \quad (5.6)$$

Исследования показали, что высота динамического свода зависит не только от площади выпускного отверстия F , м^2 , но и от его формы и может быть выражена через его гидравлический радиус R_z , м. Тогда величину расхода Q , т/ч сыпучего материала можно определить по уравнению:

$$Q = 3600 \cdot b_3 \cdot R_z \cdot F \cdot \gamma_0, \quad (5.7)$$

где b_3 - постоянная (для пшеницы - 25)

γ_0 - объемная масса сыпучего материала, т/м^3 .

Изменяя условия опирания динамического свода можно изменить расход. Так при перемещении в прямоугольном сосуде отверстия из центра в угол днища расход увеличивается на 10-15 %.

Установка над квадратным выпускным отверстием, расположенным в центре днища, трехстороннего насадка (рисунок 5.3) позволяет значительно увеличить расход. Если отношение высоты h насадки к стороне отверстия a составляет 3-4, расход пшеницы увеличивается без увеличения площади выпускного отверстия в 3-4 раза. Это объясняется увеличением высоты динамического свода, что увеличивает поверхность, через которую поступают частицы сыпучего материала в подсводное пространство.

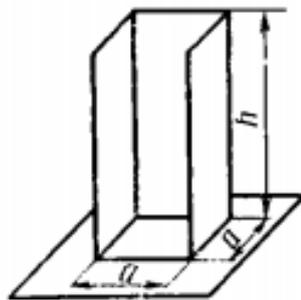


Рисунок 5.3 – Вид насадка над выпускным отверстием

Если плоское днище сосуда расположено не горизонтально, изменяются условия опирания динамического свода. В этом случае полезная площадь выпускного отверстия уменьшается в зависимости от угла наклона днища к горизонту, а при первом приближении величина расхода Q_n , т/ч сыпучего материала через выпускное отверстие, расположенное в наклонном днище сосуда, может быть определена по формуле

$$Q_n = \psi Q, \quad (5.8)$$

где $\psi = \cos^2 \frac{\alpha}{2}$;

α - угол наклона днища к горизонту;

Q - величина расхода, определяемая по формуле (5.7).

Управление давлением в потоке сыпучего материала. Зная законы изменения давления сыпучего материала на дно и стенки сосуда, можно, изменяя его свойства, влиять на величины давлений в потоке сыпучего материала.

Величина горизонтального давления потока сыпучего материала определяется его структурно-механическими свойствами. Если создать условия, при которых структурно-механические и зависящие от них силовые свойства сыпучего материала, отвечающие горизонтальным давлениям, не будут изменяться в сторону, благоприятствующую увеличению давлений, то можно сохранить минимальный уровень этих давлений. Такие условия можно создать, формируя сыпучий материал заданной структуры, изменяя структурно-механические свойства сыпучего материала в момент выпуска из сосуда, создавая сосуды специальной конструкции.

Формировать структуру сыпучего материала можно во время заполнения сосуда при помощи специального загрузочного устройства (рисунок 5.4а). Применение загрузочных конусов позволяет создать переменную структуру сыпучего материала - плотную у стен и рыхлую по центру сосуда.

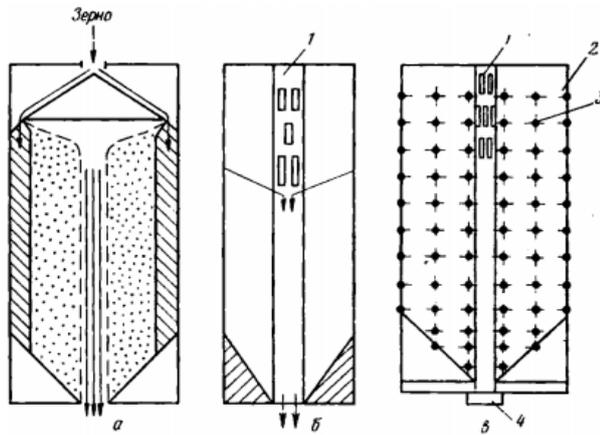
В этом случае при выпуске сыпучего материала в центре сосуда образуется связанно движущийся поток, а плотные пристенные слои остаются неподвижными. При этом величина горизонтального давления потока, передающаяся неподвижному слою, определяется размером потока, который меньше размера сосуда. По мере разгрузки сосуда разрыхляются пристенные слои материала. Процесс разрыхления и вовлечения в общий поток пристенных слоев завершается при уменьшенной высоте слоя сыпучего материала. В это время величина горизонтального давления не больше начальной.

Изменение структурно-механических свойств сыпучего материала при его выпуске достигается установкой по центру сосуда решетчатой выпускной трубы (рисунок 5.4б).

Размеры ячеек решетчатой поверхности трубы выбирают из условий обеспечения неразрывности потока (5.1).

При выпуске сыпучего материала из сосуда вначале через отверстия в трубе вытекают верхние слои. При такой системе выпускного устройства возможность образования сводчатой структуры и условия увеличения горизонтального давления резко снижаются.

Аналогичный эффект можно наблюдать при выпуске зерна из силосов через рядом находящуюся звездочку. Для этого силос по высоте через каждые 3 м соединяют со звездочкой перепускным отверстием размером 300×300 мм.



a - применение загрузочного конуса; *б* - применение выпускной трубы; *в* - применение сосуда с упругими стенами; 1 - решетчатая труба; 2 - упругая пленка; 3 - сетка из стальных тросов; 4 - выпускное устройство.

Рисунок 5.4 - Схемы управления величиной горизонтального давления

Применение эластичного материала для стен сосуда позволяет уменьшить величины горизонтальных давлений до минимальных. При заполнении таких сосудов стены упруго деформируются. При этом в слое сыпучего материала в работу включается максимальное число контактов, происходит перераспределение сил на контактах частиц, увеличивается степень вырождения сыпучего материала. В результате горизонтальное давление на стенку сосуда уменьшается. Если установить решетчатые трубы с выпускным устройством, образовавшаяся структура сыпучего материала сохраняет свои свойства до конца разгрузки сосуда (рисунок бв). Подобный сосуд ($D = 1$ м, высотой 5 м) был построен из хлорвиниловой пленки толщиной 0,1 м и выдержал многократное заполнение и разгрузку зерном. Сетка была изготовлена из стальных тросов $\varnothing 3$ мм.

Используя сводчатую структуру сыпучего материала, можно уменьшить величину вертикального давления (рисунок 5.5). Для этого в потоке сыпучего материала устанавливаются решетчатые системы, пересекающие поток сыпучего материала. Чтобы в месте установки решеток поток не прерывался, расстояние между стержнями решетки выбирают таким, чтобы расстояние между соседними стержнями в свету отвечало бы уравнению (5.1), а скорость потока удовлетворяла условию (5.2). При установке одноярусной решетки величина вертикального давления q' под ней равна

$$q' = qe^{-n\varepsilon}. \quad (5.9)$$

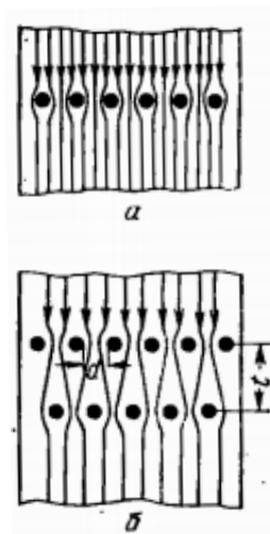
где q - единичное вертикальное давление в потоке;

n - постоянная (для пшеницы $n = 6$);

$\varepsilon = \frac{\sum F_p}{F}$ - коэффициент живого сечения решетки;

$\sum F_p$ - сумма площадей миделевых сечений просветов, m^2 ;

F - площадь потока, м^2 .



a - одноярусная решетка; b - многоярусная решетка.

Рисунок 5.5 - Установка решеток для уменьшения вертикального давления

В случае установки многоярусной решетки давление q'' под каждой следующей за первой решеткой будет равно

$$q'' = q' e^{-mt}, \quad (5.10)$$

где m - постоянная (для пшеницы $m = 1,25$);

t - расстояние между решетками, м.

Сыпучесть, подвижность частиц сыпучего материала во многом зависит от плотности, их укладки, т.е. от объема твердых частиц, приходящихся на единицу объема, материала.

Плотность укладки зерновой массы выражают или в виде коэффициента

$$K_n = \frac{V_t}{V}, \quad (5.11)$$

или в процентах

$$t = \frac{V_t}{V} \cdot 100, \quad (5.12)$$

где V_t - объем твердых частиц;

V - общий объем зерновой массы.

Опытное определение V_t сравнительно сложно, поэтому, пренебрегая массой воздуха, K_n часто рассчитывают из соотношения

$$K_n = \frac{V_t}{V} = \frac{\gamma}{\rho}, \quad (5.13)$$

где γ - объемная масса зерна;

ρ - объемная масса твердой фазы (зерен).

Плотность укладки зерновой массы зависит:

- от физических параметров зерен и примесей - их формы, состояния поверхности, упругости;
- от характеристик емкости, заключающей, зерновую массу - от ее формы, размеров, материала и степени шероховатости стен;
- от количества и вида сорных примесей;
- от способа формирования зерновой насыпи - от метода заполнения хранилища (струей или «дождем»), от высоты падения зерна и инерционных усилий.

При воздействии этих причин плотность укладки может носить и локальный (местный) характер, не распространяясь на весь объем зерновой насыпи.

Плотность укладки зерновой массы увеличивается во времени за счет вибрации и явления слеживания.

Порывы ветра, сотрясающие здания хранилищ, вибрация работающих машин передаются и частицам зерновой массы. Нормальные усилия и силы сухого трения, за счет которых сохраняется взаимное расположение частиц, в отдельные моменты цикла колебаний становятся меньше сил собственного веса и давления вышележащих слоев, стремящихся сместить частицы. Зерновая масса уплотняется, расположение ее частиц становится более упорядоченным. Влияет и явление слеживания, когда под давлением вышележащих слоев часть упругих деформаций зерен со временем переходит в остаточные.

При влажности от 12,5 % до 13,5 % коэффициент плотности укладки пшеницы и ржи находится в пределах 0,55 - 0,65; кукурузы (зерна) 0,55 - 0,62.

Плотность укладки, которая непосредственно определяет прочность связей между зернами, растет с глубиной засыпки. С увеличением плотности укладки за счет деформации зерен увеличивается число площадок контакта между соседними зернами, растет величина каждой площадки и их суммарная площадь S . В соответствие с этим растут силы внутреннего и внешнего трения, пропорциональные величине трущихся поверхностей; подвижность зерен соответственно уменьшается.[4]

5.2 Порядок выполнения работы

Работу выполняют подгруппы в 2-3 человека. Опыты проводят в трехкратной повторности в следующей последовательности.

1. Сосуд заполняется зерном с минимально-возможной плотностью укладки ($V_{об}$);

2. Секундомером определяется время, истечения зерна из сосуда;
3. Определяется масса образца;
4. После определения массы образец вновь помещают в сосуд и уплотняют, измеряют необходимые величины для определения объема сыпучего материала после уплотнения ($V'_{об}$);
5. Определяется время истечения уплотненного образца, результаты экспериментов заносим в таблицу 5.1;
6. Рассчитывается производительность истечения зерна до и после уплотнения;
7. Определяется коэффициент плотности укладки зерна до и после уплотнения.

Необходимые для расчетов данные берем из лабораторной работы № 1

Таблица 5.1 – Результаты экспериментов

Характер заполнения емкости	Повтор	Масса образца g, кг	τ с	V_T см ³	$V_{об}$ см ³	$V'_{об}$ см ³	h мм	D мм	K_n	Q_o кг/с
Без уплотнения, свободным засыпанием	1									
	2									
	3									
Среднее значение										
С уплотнением материала	1									
	2									
	3									
Среднее значение										

5.3 Вопросы для контроля

1. Что понимают под потоком сыпучего материала?
2. На какие виды подразделяют движение потока сыпучих материалов?
3. Чем характеризуется процесс истечения сыпучего материала из отверстий сосудов?
4. Что позволяет добиться установка над квадратным выпускным отверстием, расположенным в центре днища, трехстороннего насадка?
5. Какие существуют схемы управления величиной горизонтального давления?
6. От чего зависит плотность укладки зерновой массы?

Список использованных источников

1. Трисвятский, Л.А. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Л.А. Трисвятский, Б.В. Лесик, В.Н. Курдина. - 4-е изд., перераб. и доп. - Москва: Агропромиздат, 1991. - 415 с.
2. Юкиш, А.Е. Техника и технология хранения зерна / А.Е. Юкиш, О.А. Ильина. – Москва: ДеЛи принт, 2009. – 718 с.
3. Пунков, С.П. Хранение зерна, элеваторно-складское хозяйство и зерносушение / С.П. Пунков, А.И. Стародубцева. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: Агропромиздат, 1990. - 367 с.
4. Платонов, П.Н. Элеваторы и склады: учеб. для студентов вузов / П.Н. Платонов, С.П. Пунков, В.Б. Фасман. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва: Агропромиздат, 1987. - 319 с.