

В.В.ГОРТИНСКИЙ, А.Б.ДЕМСКИЙ,
М.А.БОРИСКИН

ПРОЦЕССЫ
СЕПАРИРОВАНИЯ
НА ЗЕРНО-
ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ
ПРЕДПРИЯТИЯХ

Издание второе, переработанное и дополненное



МОСКВА «КОЛОС» 1980

ББК 36.821
Г70
УДК 664.726

Рецензент — доцент Воронежского технологического института, кандидат технических наук Н. Е. Авдегов.

Гортинский В. В. и др.

Г 70 Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В. В. Гортинский, А. Б. Демский, М. А. Борискин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Колос, 1980. — 304 с., ил.

В книге приведены способы совершенствования технологии сепарирования, повышения производительности, эффективности и надежности сепарирующих машин.

Во втором издании описаны новые сепарирующие машины, комплексные технологические линии и направления дальнейшего совершенствования технологии и техники сепарирования. Рассчитана на научных работников в области хранения и переработки зерна.

Г 40600—136
035(01)—80 211—80. 2903000000

ББК 36.821
6П8.1

ОТ АВТОРОВ

В книге показано значение процессов сепарирования в общей технологии приемки, хранения и переработки зерна, влияние их на использование зерновых ресурсов, количество и качество готовых продуктов. Обоснована также необходимость дальнейшего совершенствования технологии сепарирования, повышения производительности, эффективности и надежности сепарирующих машин как важного направления технического прогресса в системе Министерства заготовок СССР.

Данная книга — это обобщение работ многих исследователей в области теории и техники сепарирования, а также опыта создания новых сепарирующих машин, внедренных на зерноперерабатывающих предприятиях в последнее десятилетие. Особое внимание в ней обращено на раскрытие физической сущности процессов сепарирования в связи с различием свойств разделяемых компонентов, что необходимо для установления оптимальных параметров машин, осуществления более эффективных процессов и создания новых машин.

Изложены теоретические основы наиболее распространенных способов сепарирования. Рассмотрены основные технологические узлы и вспомогательные устройства, от работы которых зависят технико-экономические показатели машин. Приведены сведения о технических приемах, процессах сепарирования в комплексных технологических линиях, а также направления дальнейшего совершенствования технологии и техники сепарирования.

Книга предназначена для научных работников, занимающихся совершенствованием технологических процессов в области хранения и переработки зерна.

Одна из важнейших технологических операций в процессах приемки, хранения и переработки зерна — это сепарирование, т. е. разделение сыпучих материалов на фракции, отличающиеся свойствами частиц. Степень очистки основной культуры и точность классификации посевного материала во многом влияют на урожай, а также на стабильность качества зерна при хранении. Очистка зерна перед измельчением на мукомольных заводах и перед шелушением на крупяных заводах предопределяет качество готовой продукции. И, наконец, четкость сепарирования на промежуточных стадиях измельчения и шелушения не только влияет на качество продукции и степень использования сырья, но и определяет нагрузку и эффективность работы остальных технологических машин, а следовательно, производительность и технико-экономические показатели предприятий в целом. Достаточно отметить, что недосев мелких фракций в крупках, поступающих на ситовечные машины, не позволяет установить оптимальный воздушный режим; недосев муки в крупках и дунстах, поступающих на размол, приводит к перегрузке вальцового станка и снижает качество муки; неполное извлечение ядра из продуктов шелушения крупяных культур вызывает увеличение количества дробленки и перегрузку шелушительных машин.

Имеющееся оборудование для сепарирования зерна и продуктов его переработки по своим эксплуатационным качествам — производительности, эффективности и надежности — не отвечает возрастающим требованиям промышленности. Создание новой, более совершенной техники и усовершенствование технологических приемов ее эксплуатации при хранении и переработке зерна встречает ряд трудностей, обусловленных многими причинами, важнейшие из которых следующие: многообразие сепарируемых материалов и способов сепарирования; сложность и разнообразие механических явлений взаимодействия частиц сепарируемых материалов друг с другом и с рабочим органом машины; недостаточное развитие тео-

ретических основ сепарирования и инженерных методов расчета параметров процесса и машины.

Овладение научными представлениями о сущности различных процессов сепарирования необходимо не только для создания новых машин, но и для определения оптимальных условий эксплуатации имеющихся машин, сокращения сроков внедрения новой техники, усовершенствования технологических процессов хранения и переработки зерна в целом, для обобщения производственного опыта.

В последние годы для промышленности хранения и переработки зерна созданы новые сепарирующие машины: ворохоочистители, зерноочистительные сепараторы, мельничные и крупяные рассевы, ситовечные машины, камнеотделительные машины и другие. Некоторые из них по принципу действия и устройству отличаются от машин, применявшихся до этого на предприятиях.

Темпы внедрения и дальнейшее усовершенствование этого оборудования в большой мере зависят от понимания закономерностей процессов сепарирования. Авторы постарались обобщить результаты исследований в области сепарирования зерна для того, чтобы помочь инженерно-техническим работникам зерноперерабатывающих предприятий, научно-исследовательских институтов, конструкторских бюро повысить знания и профессиональную подготовку, необходимые для успешного труда.

Большая часть исследований выполнена в Московском технологическом институте пищевой промышленности (МТИПП), Всесоюзном научно-исследовательском институте зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ) и Горьковском отделении Всесоюзного научно-исследовательского и экспериментально-конструкторского института продовольственного машиностроения (ВНИЭКИпродмаш) в результате многолетнего творческого содружества этих коллективов.

Книга, как и в первом издании, включает два раздела. В отличие от предыдущего издания в первый раздел «Теоретические основы процессов сепарирования» включены дополнительно три главы: глава V «Вибрационное сепарирование на плоских ячеистых поверхностях», глава VIII «Магнитное сепарирование» и глава X «Процессы сепарирования в технологических линиях очистки зерна». Включение перечисленных глав ликвидирует пробел, имеющийся в первом издании по этим важным вопросам.

Внесены дополнения и в отдельные главы. Например, глава I «Общие сведения и характеристика процессов сепарирования» дополнена основными требованиями к сепарирующим машинам.

Совершенно по-новому написана глава VII, которая стала называться «Пневматическое сепарирование». В этой главе обобщены результаты исследований, проведенных в последнее время. Обращено внимание на теоретические предпосылки процесса сепарирования, оценку эффективности, влияние отдельных факторов и параметров процесса на эффективность сепарирования зерновых,

крупяных и технических культур, что очень важно знать при конструировании новых машин.

В главе VIII «Магнитное сепарирование» приведены теоретические предпосылки и обращено внимание на определение основных параметров сепарирующих устройств для выделения металломагнитных примесей.

Учитывая, что сепарирующие машины более подробно описаны в других изданиях, из второго раздела книги в отличие от первого издания исключена глава: «Краткая характеристика сепарирующих машин», поэтому данный раздел получил новое название: «Технологические и вспомогательные устройства сепарирующих машин».

Поскольку приемно-распределительным устройствам, устройствам с ячеистыми поверхностями и механизмам для очистки сит в последние годы в специальной литературе было уделено много внимания, а также учитывая то, что нет новых принципиальных решений и разработок по сравнению с изложенными в предыдущем издании книги, соответствующие главы из данного издания исключены.

Перечисленные изменения и дополнения книги, по мнению авторов, будут в большей мере соответствовать современному состоянию теории и техники сепарирования зерна и продуктов его переработки.

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ СЕПАРИРОВАНИЯ

§ 1. Классификация и краткая характеристика процессов сепарирования

Цели и способы сепарирования продуктов на хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятиях весьма разнообразны. Основные цели следующие:

очистка зерновых смесей от примесей, ухудшающих условия хранения, транспортирования и переработки зерна или снижающих качество готовой продукции;

сортирование зерна на фракции различного качества для переработки в продукты разного назначения; сортирование зерна на фракции для отдельной переработки в продукты одинакового назначения (калибрование гречихи и некоторых других крупяных культур для отдельного шелушения);

извлечение готовых продуктов в процессе переработки (отбор продуктов на мукомольных заводах);

сепарирование промежуточных продуктов переработки для их отдельной обработки на последующих операциях.

Признаки, которыми должны отличаться частицы фракций, далеко не всегда совпадают с признаками, по которым можно механически разделить сыпучую смесь. Например, по химическому составу или биологической природе частиц смесь можно разделить при помощи механических воздействий только в тех случаях, если этим признакам сопутствуют различные физико-механические свойства: размеры, форма, плотность, коэффициенты трения, магнитная восприимчивость и т. д.

Таким образом, успех сепарирования зависит прежде всего от степени соответствия желаемых признаков разделения, обусловленных потребностями производства, возможным признакам разделения, определяющим различное движение частицы в процессе сепарирования смеси.

Связь между этими группами признаков устанавливают после массовых опытов, в результате которых составляют корреляционные таблицы и графики, а надежность и силу связи выражают коэффициентами корреляции. Для механических способов сепарирования сыпучих материалов используют следующие признаки частиц:

длину — максимальный размер частицы;
ширину — максимальный размер наибольшего по площади сечения, перпендикулярного линии длины;
толщину — минимальный размер того же сечения;
форму, оцениваемую коэффициентом формы в виде отношения длины к толщине;

плотность — отношение массы частицы к ее объему;
упругость, оцениваемую коэффициентом восстановления нормальной скорости, т. е. отношением проекции скорости после удара о неподвижную поверхность к такой же проекции скорости до удара;

трение о поверхность, оцениваемое коэффициентом сухого трения, т. е. отношением тангенциальной реакции связи к нормальной реакции при относительном движении;

магнитную восприимчивость, оцениваемую силой, с которой на массу в 1 г действует магнитное поле с единичной магнитной индукцией и напряженностью.

Для использования различия по этим признакам частиц смеси при ее сепарировании на две и более фракций применяют разные способы механического воздействия.

Механические воздействия в процессе сепарирования выполняют три функции: во-первых, они заставляют частицы с различными свойствами перемещаться в разные места рабочего пространства; во-вторых, они обеспечивают непрерывное поступление смеси в рабочее пространство; в-третьих, разделяют из рабочего пространства полученные фракции. Характер механических воздействий на частицы при выполнении этих функций может быть одинаковым или различным. Например, при сепарировании в вертикальных пневматических каналах смесь в рабочее пространство поступает обычно гравитационным истечением из питателя или при помощи вибрлотка; смесь разделяется на легкие и тяжелые частицы под совместным воздействием аэродинамических сил и сил тяжести, так же происходит и отдельное удаление легкой и тяжелой фракций из рабочего пространства.

При ситовечном процессе различное направление движения частиц компонентов смеси в рабочем пространстве машины обусловлено совместным действием сил тяжести, аэродинамических сил и вибраций.

В рабочее пространство смесь поступает по вибрирующему лотку, из рабочего пространства частицы компонентов выводятся различно: легкие уносит восходящий воздушный поток, крупные частицы с большой плотностью сходят с сита под воздействием вибраций, а меньшие по размерам, но большей плотности просеиваются через сито.

Наиболее четкого сепарирования можно достигнуть, если способ механического воздействия в производственном процессе совпадает с лабораторным способом определения того признака, по которому производят сепарирование. Например, плотность частиц определя-

ют обычно погружением их на тонкой нити в жидкость известной плотности и измеряют натяжение нити до и после погружения.

Частицы разной плотности можно разделить гидростатическим способом, погрузив их в жидкость, плотность которой больше плотности частицы одного компонента (легкого), но меньше плотности частицы другого компонента (тяжелого). Более плотные частицы утонут, а менее плотные останутся на поверхности.

Другим примером может служить разделение по размерам, например по ширине, которую измеряют обычно штангенциркулем, микрометром или инструментальным микроскопом.

Чтобы извлечь из смеси частицы с шириной, меньшей предельно допустимой по технологическим требованиям, применяют пробивные сита с круглыми отверстиями, каждое из которых представляет собой «предельный калибр». Для точного разделения смеси каждую частицу нужно подвергнуть испытанию — «пробиванию» к отверстию в том положении, в котором измеряли ширину, т. е. ось измерения длины должна быть перпендикулярна поверхности сита.

Однако сепарирование частиц по плотности и по толщине в производственных условиях происходит не так, как определяют соответствующие свойства. Это обусловлено непрерывностью процесса и требованиями к габаритным размерам, массе, простоте конструкции, производительности и надежности сепарирующих машин.

Чтобы удовлетворить этим требованиям при сепарировании по плотности гидростатическим способом, для очистки машины, непрерывной подачи в нее исходной смеси и вывода фракций после разделения пришлось бы вызвать движение жидкости, т. е. сделать процесс гидродинамическим. При этом на движение частицы, определяющее ее попадание в легкую или тяжелую фракцию, оказали бы влияние не только плотность, но и размеры, форма и состояние поверхности. Отметим также, что при гидравлическом сепарировании увеличивается влажность продукта.

Ситовое сепарирование по ширине частиц осуществляют обычно при колебаниях наклонных плоских сит, по которым продукт перемещается слоем с толщиной, в несколько раз превышающей толщину частиц.

Чтобы частица с шириной, меньшей, чем диаметр отверстия, просеялась через него, ей необходимо занять положение в нижнем слое и осью измерения длины ориентироваться перпендикулярно поверхности сита. Выполнению первого условия благоприятствует увеличение плотности и уменьшение объема данной частицы по сравнению с плотностью и объемом окружающих частиц; выполнению второго условия благоприятствует увеличение общей толщины слоя и высоты его подбрасывания над ситом, а также уменьшение коэффициента формы данной частицы.

Таким образом, и в этом случае основной признак разделения не единственный, а результаты сепарирования зависят не только от этих признаков, но и от параметров процесса. Действие второстепенных признаков может совпадать по направлению с действием

Таблица 1. Классификация процессов сепарирования

Признаки различия частиц	Способ сепарирования		Название машины	Характерные случаи применения
	основные	сопутствующие		
Длина	Форма	Триерование	Триеры	Очистка зерна пшеницы от овсюга и куколя Извлечение ядра из продуктов шелушения овса
Ширина	Плотность, форма (длина)	Просеивание на колеблющихся ситах с круглыми и квадратными отверстиями	Зерноочистительные сепараторы (ситовая часть)	Фракционирование зерна пшеницы. Очистка зерна на различных культурах от крупных примесей
Толщина	Плотность, форма	Просеивание на колеблющихся ситах с прямоугольными удлиненными отверстиями	Зерноочистительные сепараторы (ситовая часть)	Очистка зерна от мелких тяжелых примесей — подсева
Плотность частиц и коэффициент трения	Размеры, форма	Вибрационное перемещение в аэрируемом слое без просеивания	Вибропневматические камнеотделительные машины, сортировальные (денсиметрические) столы	Очистка зерна различных культур от минеральных примесей Разделение продуктов шелушения крупажных культур с выделением ядра
Скорость витания (плотность, размеры)	Состояние поверхности	Пневматическое (воздушное) сепарирование	Аспирационные колонки, аспираторы, пневмоканалы зерноочистительных сепараторов	Очистка зерна от легких примесей, извлечение шуплого зерна

Признаки различия частиц	Способ сепарирования		Название машины	Характерные случаи применения
	основные	сопутствующие		
Скорость витания, размеры	Форма	Ситовое ситный процесс	Ситовые ситные машины	Сепарирование продуктов измельчения зерна (обогашение), т. е. отбор по содержанию эндосперма
Размеры	Плотность, форма	Просеивание на горизонтальных ситах с круглыми поступающими колебательными в горизонтальной плоскости	Рассевы мельничные и крупажные	Сепарирование продуктов измельчения зерна на мукомольных заводах и сепарирование продуктов шелушения на крупажных заводах
Упругость и коэффициент ударного трения	Плотность, форма	Виброударное сепарирование	Падди-машины, крупноотделитель Беспадова	Извлечение ядра из продуктов шелушения риса и некоторых других крупажных культур
Форма, плотность, коэффициент трения	Размеры	Вибрационное перемещение по ячеистым плоским поверхностям	Сепарационные столы типа «Сатаке» (Япония) и БКО (СССР)	Извлечение ядра из продуктов шелушения крупных культур
Плотность	Размеры, форма, состояние поверхности	Самосортирование при горизонтальных круглых поступающих колебаниях конических поверхностей	Камнеотделитель Григоревича	Очистка зерна от минеральных примесей
Размеры, коэффициент трения, плотность	Форма	Просеивание на неподвижных наклонных ситах	Сортирующие горки	Отбор ядра из продуктов шелушения риса
Магнитная восприимчивость	Размеры, коэффициент трения	Магнитное сепарирование	Магнитные сепараторы	Очистка зерна и продуктов его переработки от металломагнитных примесей

основного признака разделения, а может быть ему противоположным.

В литературе по вопросам сепарирования и сепарирующих машин для зерна и продуктов его переработки принято связывать способы сепарирования, сепарирующие машины и признаки различия частиц (табл. 1). Условность такой взаимосвязи очевидна, но для предварительного выбора способа сепарирования и типа машины по заданным признакам различия она представляется полезной. В ряде случаев, когда несколько признаков различия оказывают соизмеримое влияние на результаты сепарирования, свойства частицы характеризуют косвенно через параметр механического воздействия, определяющий направление движения частицы при сепарировании. Такой косвенной характеристикой служит, например, скорость витания частицы в восходящем воздушном потоке, зависящая от плотности, размеров, формы и состояния поверхности частицы.

Выбор способа сепарирования в зависимости от основных признаков различия частиц разделяемых компонентов сыпучей смеси часто неоднозначен. На него влияют не только направленность действия сопутствующих признаков различия, но и ряд других факторов: место и значение данной операции сепарирования в общем технологическом процессе предприятия, энергоемкость способа, требуемая производительность и т. д.

Влияние этих факторов можно видеть на примере очистки зерна пшеницы от равновеликих частиц минеральных примесей. Основным признаком различия компонентов данной смеси — это плотность, которая у минеральных частиц вдвое больше, чем у зерен пшеницы, что позволяет очень точно разделять смесь в пневмосепарирующем канале по скорости витания.

Однако такой способ на предприятиях хранения и переработки зерна не применяют из-за чрезвычайно малой концентрации тяжелого компонента (тысячные доли процента) и больших затрат электроэнергии. Иначе говоря, в таком случае из смеси извлекали бы не минеральные примеси, а зерно. Поэтому на практике применяют машины, основанные на других, более экономичных способах: в основном дисковые и вибропневматические камнеотделительные машины.

§ 2. Общие сведения о сепарируемых материалах

Для правильного выбора способов сепарирования и оптимизации параметров процесса необходимы сведения о численных значениях величин, характеризующих свойства частиц разделяемых компонентов смеси.

Однако в подавляющем большинстве случаев не удается назвать точного значения этих величин. Для зерен основных культур, зерновых и сорных примесей это обусловлено зависимостью от сор-

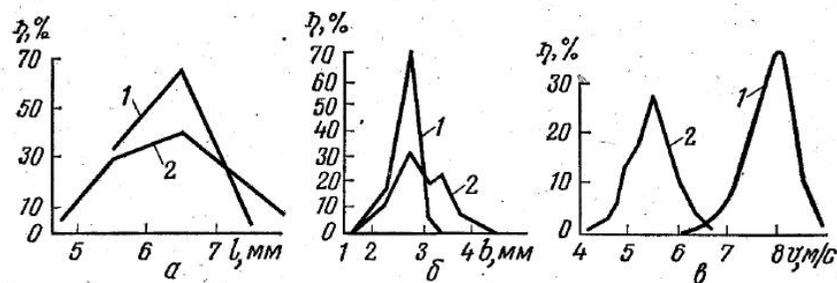


Рис. 1. Вариационные кривые пшеницы 1 и курая 2 по: а — длине; б — толщине; в — скорости витания.

та и климатических условий, а в пределах одного сорта и одинаковых климатических условий — от времени и способа уборки, от положения зерна в колосе, влажности и т. д.

Свойства многих примесей зависят также от способов уборки, предварительной обработки зерновой массы, способа и условий транспортирования и т. д.

Кроме того, численные значения характеристик свойств зависят от методики определения и устройств или приборов, применяемых для этого.

Поэтому данные, приведенные в таблицах 2 и 3, следует рассматривать как ориентировочные, требующие уточнения при практическом решении задач сепарирования в каждом конкретном случае. Эти данные относятся или к средним значениям величин, или к пределам их изменения.

Как видно, для многих культур и их примесей области значений величин, характеризующих свойства как возможные признаки разделения, существенно перекрывают друг друга. По этим данным трудно судить о возможной четкости разделения компонентов смеси даже при идеальной эффективности процесса.

Для выбора принципа или схемы сепарирования по данным исследования физико-механических свойств зерен основной культуры и сопутствующей ей примеси строят вариационные кривые и корреляционные таблицы.

Например, при рассмотрении вариационных кривых пшеницы и курая по длине и толщине (рис. 1, а, б) отметим, что данную зерновую смесь в триерах и на ситах разделить нельзя, так как области изменения длины и толщины в основном перекрываются. Разделить ее можно потоком воздуха (рис. 1, в) и то не полностью, потому что в сепарирующем канале трудно создать равномерное поле скоростей воздуха. Отклонение значения скорости воздушного потока от номинального приведет к снижению четкости сепарирования. Поэтому лучшие результаты получаются при одновременном действии на смесь вибраций и восходящего воздушного потока (ситовечные машины, пневмосортировальные столы).

Таблица 2. Физико-механические свойства зерновых культур

Культура	Размеры, мм			Плотность, г/см ³	Масса 1000 зерен, г
	длина	ширина	толщина		
Пшеница	4,8—8,0	1,6—4,0	1,5—3,3	1,20—1,50	20—40
Рожь	5,0—10,0	1,4—3,6	1,2—3,5	1,20—1,50	13—32
Овес	8,0—18,6	1,4—4,0	1,0—4,0	1,20—1,40	20—42
Ячмень	7,0—14,6	2,0—5,0	1,2—4,5	1,20—1,40	31—51
Рис	5,0—7,0	2,5—2,8	2,0—2,5	1,19—1,26	19
Гречиха	4,2—6,2	2,8—3,7	2,4—3,4	0,85—1,25	21
Кукуруза	5,5—13,5	5,0—11,5	2,5—8,0	1,35	286
Горох	4,0—8,8	4,0—9,0	3,0—9,0	1,40	135
Просо	1,8—3,2	1,5—2,0	1,5—1,7	1,10—1,20	7

Продолжение

Культура	Натура, кг/дм ³	Коэффициент внутреннего трения	Скважистость, %	Коэффициент внешнего трения		
				по дереву	по стали	по бетону
Пшеница	0,76	0,47	54,0	0,40	0,37	0,40
Рожь	0,73	0,49	38,0	0,40	0,37	0,42
Овес	0,45	0,51	68,0	0,45	0,37	0,45
Ячмень	0,65	0,51	47,4	0,40	0,37	0,43
Рис	0,52	0,51	49,0—56,0	0,44	0,34	0,43
Гречиха	0,72	0,52	55,5	0,44	0,37	0,42
Кукуруза	0,73	0,53	35,0—55,0	0,35	0,37	0,42
Горох	0,83	0,55	—	0,32	0,37	0,30
Просо	0,85	0,52	30,0—50,0	0,40	0,34	0,34

Таблица 3. Физико-механические свойства примесей

Примеси	Размеры, мм			Плотность, г/см ³	Масса 1000 зерен, г
	длина	ширина	толщина		
Овсяг	8,0—20,0	1,75—3,00	1,25—3,00	0,90—1,10	15,00—25,00
Татарская гречиха	4,0—5,6	2,20—3,60	2,20—3,60	1,00—1,30	2,00—6,00
Куколь	2,8—4,4	2,00—3,80	1,60—3,00	1,10—1,30	7,00—10,00
Спорынья	2,0—8,5	1,00—3,00	0,80—1,80	0,90—1,14	2,00—2,20
Дикая редька	3,0—8,1	2,00—5,80	1,70—5,00	0,85—1,00	8,00—10,00
Гречиха вьюнковая	2,0—3,6	1,60—2,80	1,60—2,60	1,00—1,30	2,00—6,00
Полевой вьюнок	2,4—4,3	1,40—3,40	1,10—2,80	0,97	10,00—11,00
Костер ржаной	7,0—10,0	1,75—2,00	1,50—1,75	0,30—0,40	6,00—8,00
Головки осота	2,5—3,5	0,80—1,50	0,40—0,90	0,74	0,37
Куриное просо	2,4—5,0	1,20—2,60	0,70—2,00	0,80—1,25	1,50—2,00
Рисовое просо	3,0—3,5	2,00—2,50	1,20—2,00	1,15—1,25	2,00—4,00
Курмак	4,0—5,0	1,70—3,50	1,20—2,80	0,80—1,15	6,00—7,00
Курай	5,0—8,5	1,70—2,50	1,60—4,50	0,90—1,10	2,00—2,50

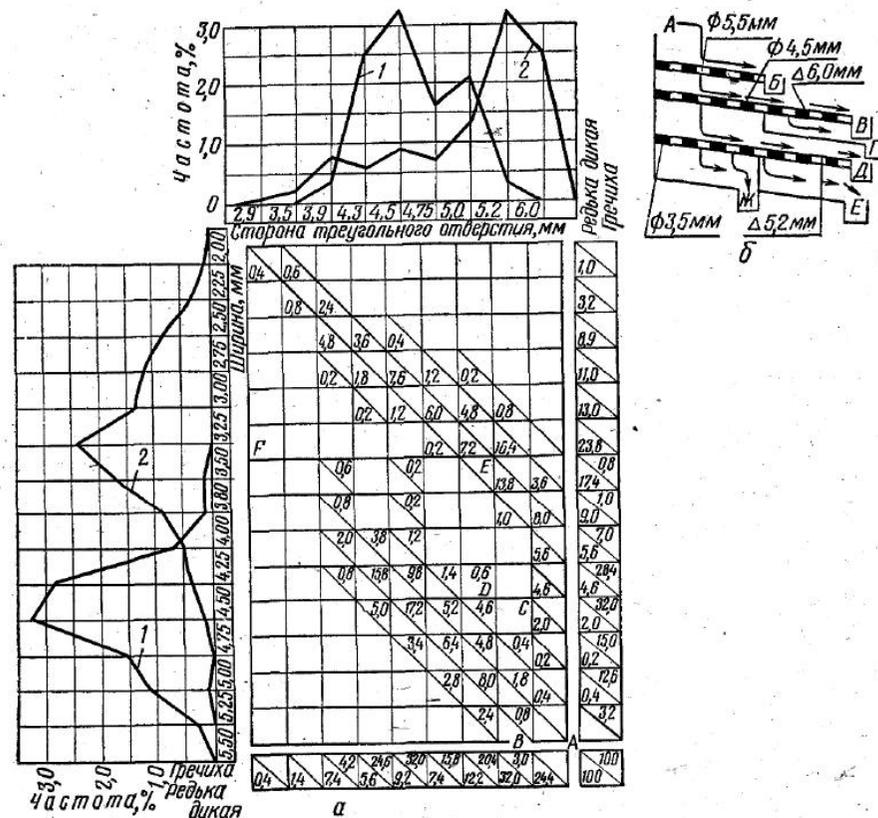


Рис. 2. Корреляционная таблица (а) для зерна гречихи и плодов дикой редьки по ширине и распределению на ситах с треугольными отверстиями и схема технологического процесса (б):

1 — гречиха; 2 — дикая редька; А — исходный материал; В — крупные примеси; В — крупные плоды дикой редьки (2,6%); Г — крупные зерна гречихи (62,8%); Д — плоды дикой редьки средних размеров (36,6%); Е — мелкие зерна гречихи (37,2%); Ж — мелкие плоды дикой редьки (60,8%).

Примеры. 1. Составить схему сепарирования по корреляционной таблице (рис. 2, а) зерен гречихи и дикой редьки по ширине и распределению на ситах с треугольными отверстиями. Вариационные кривые перекрываются, однако ни в одной ячейке таблицы нет смеси гречихи и дикой редьки. Это говорит о том, что данную зерновую смесь можно разделить в несколько приемов.

Для выделения крупных плодов дикой редьки шириной более 4,5 мм ставят треугольное сито со стороной 6 мм. Сход с сита — крупные плоды дикой редьки (2,6%), проход — крупные зерна гречихи (37,2%), т. е. сита подбирают по ломаной ABCDEF. С учетом некоторых технологических приемов, например для выделения мелких зерен и примесей, дополнительно устанавливают сита с круглыми пробивными отверстиями, составляют схему технологического процесса отделения плодов дикой редьки от зерен гречихи (см. рис. 2, б).

2. Рассмотрим также результаты определения физико-механических свойств шелушеного и нешелушеного риса для их разделения [23].

На рисунке 3 представлены кривые распределения размеров и плотностей, из которых видно, что ни по одному отдельно взятому признаку полностью разделить исходную смесь невозможно. Однако между плотностью зерен ρ и толщиной b найдена нелинейная корреляционная зависимость (рис. 3, г) с отношением,

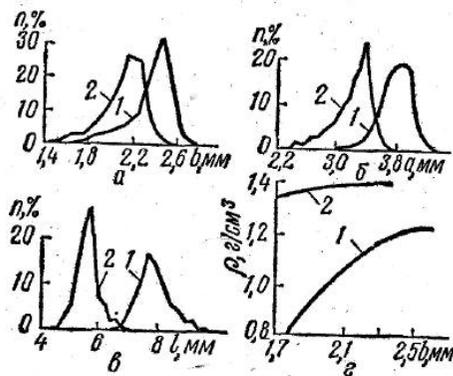


Рис. 3. Кривые распределения компонентов шелушеного и нешелушеного риса:

а — по толщине; б — по ширине; в — по длине; г — корреляционная связь между плотностью зерен риса и их толщиной; 1 — нешелушенный рис; 2 — шелушенный рис.

скорость витания некоторых примесей и семян сорняков такая же, как и полноценных зерен.

Разнородность частиц смеси, одновременное нахождение в зоне сепарирования многих частиц, взаимодействие их друг с другом, неравномерность поля скоростей потока воздуха и ряд других факторов не позволяют полностью выделить в пневмосепарирующем канале семена сорняков и органические примеси из зерновой смеси.

Поэтому при подготовке к хранению на элеваторе и переработке на мукомольном или крупяном заводе зерно многократно очищают в пневмосепарирующих устройствах.

Следует отметить, что скорость витания для одного и того же вида культуры и примесей, одного класса и района произрастания колеблется, следуя закону нормального распределения.

Как видно из рисунка 4, скорость витания отдельных зерновок пшеницы (Лютесценс 17) изменяется от 7,0 до 13,2 м/с, а ее примесей — от 1,0 до 8,2 м/с. Соответственно скорости витания зерновок овса (Советский) изменяются от 4,2 до 11,5 м/с, а его сорных примесей — от 0,8 до 7,0 м/с.

В общем случае большой разброс значений основных признаков разделения затрудняет условия сепарирования и не позволяет получить высокий эффект при удовлетворительном качестве се-

равным 0,815 для риса-сырца (нешелушеного) и 0,707 для ядра (шелушеного). Уравнения регрессии ρ от b (при влажности $W=15\%$) получены в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\text{для риса-сырца } \rho_{\text{рис}} = -2,6175 + \\ &+ 2,9041b - 0,5465b^2; \\ &\text{для ядра } \rho_{\text{ш}} = 0,6541 + 0,6097b - \\ &- 0,1244b^2. \end{aligned}$$

Поэтому в применяемых сейчас машинах для сортирования продуктов шелушения риса (падди-машины, БКО и другие) используют совокупность взаимно усиливающих признаков разделения.

В таблице 4 приведены ориентировочные значения скоростей витания основных зерновых культур и примесей (точные данные в каждом отдельном случае получают в результате эксперимента). Из данных таблицы 4 видно, что

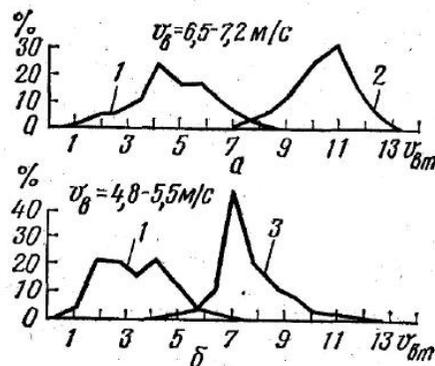


Рис. 4. Вариационные кривые по скорости витания:
а — пшеницы 2 с примесью 1; б — овса 3 с примесью 1.

Таблица 4. Скорости витания семян и примесей

Культура и примеси	Величина скорости витания, м/с															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Пшеница:																
нормальная																
битая поперек																
битая вдоль																
щуплая																
Рожь																
Ячмень																
Овес																
Гречиха																
Просо																
Горех																
Подсолнечник																
Кукуруза																
Курополь																
Овсяг																
Вьюнок																
Гречишка																
Пырей																
Василек																
Спорынья																
Редька дикая																
Горчак																
Кнопля																
Легкие сорняки																
Мякина																
Курай																

парирования. В приведенных примерах наложение частиц зерновок и примесей с одинаковыми скоростями витания невелико, целесообразные зоны скоростей воздуха при сепарировании колеблются для пшеницы от 6,5 до 7,2 м/с и для овса от 4,8 до 5,5 м/с.

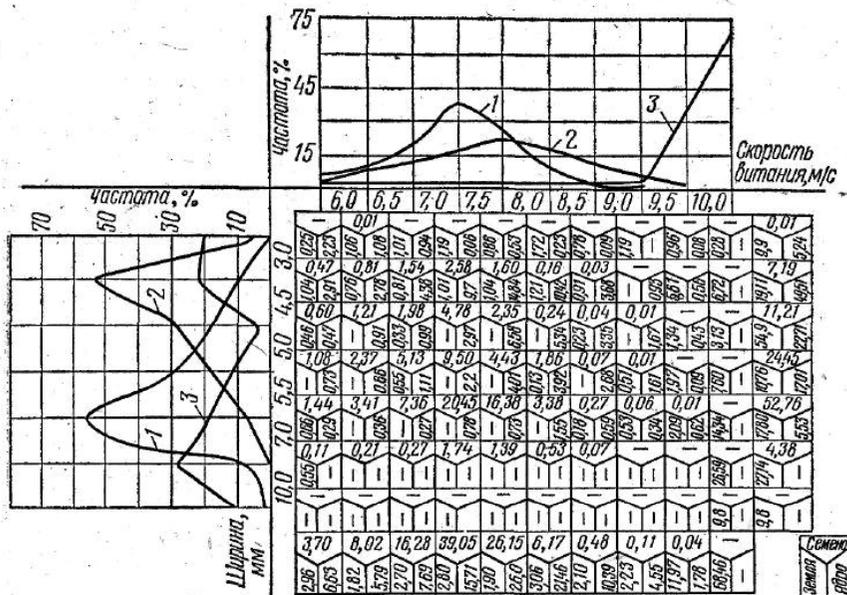


Рис. 5. Вариационные кривые и корреляционная таблица «размер — скорость витания»:

1 — семена подсолнечника; 2 — ядра; 3 — минеральные примеси.

На рисунке 5 приведена корреляционная таблица, устанавливающая связь между геометрическими размерами и скоростью витания семян подсолнечника, ядра и минеральных примесей. Из данных рисунка 5 видно, что основная масса семян имеет скорость витания в пределах 6,0—8,5 м/с, что практически позволяет выделять легкие примеси со скоростями витания не более 5,5 м/с.

Поэтому понятие «примесей, отделимых воздушным потоком», конкретно для каждого вида сепарируемой смеси, определяемой физико-механическими свойствами компонентов, и в первую очередь кривыми распределения скоростей витания или коэффициентов пропорциональности силы аэродинамического сопротивления [32] зерновок и примесей. Предельное значение «отделимости» примесей следует устанавливать по значениям скорости витания $v_{вт}$ или коэффициента K_0 , характерным для наиболее легкой части зерновок основной культуры.

Так, из рисунка 6 видно, что кривые распределения скоростей витания примесей и двух сортов зерна пшеницы перекрываются по-разному. Следовательно, степень выделения примесей будет различной, и, в частности, часть примесей, отделимых в смеси с пшеницей Гиза 144, будет неотделима в смеси с пшеницей Безенчукская 98.

Для наглядного представления о характере легких (средненатурных) примесей на рисунке 7 приведены фотографии 15 фракций, полученных в результате воздушной классификации. Номера на фо-

тографиях соответствуют номерам по порядку (в скобках) в первой колонке таблицы 5.

Как видно из фотографий, примеси содержат различные по размерам частицы: от крупных частиц половы и оболочек овсяго до мельчайших частиц раздробленного зерна, измельченных оболочек и других. В значительном количестве примеси содержат также щуплые зерна пшеницы.

Явление витания большого числа зерновок в воздушном канале — достаточно сложный процесс. С увеличением скорости воздуха зона витания растягивается по высоте. До сих пор еще не вскрыты причины распределения витающих частиц в зоне витания. При наблюдении процесса витания зерновок в прозрачном канале можно заметить его сходство с процессом автоколебаний, где источник возмущения — это сила аэродинамического сопротивления, переменная во времени и определяющаяся ориентацией зерновки относительно потока.

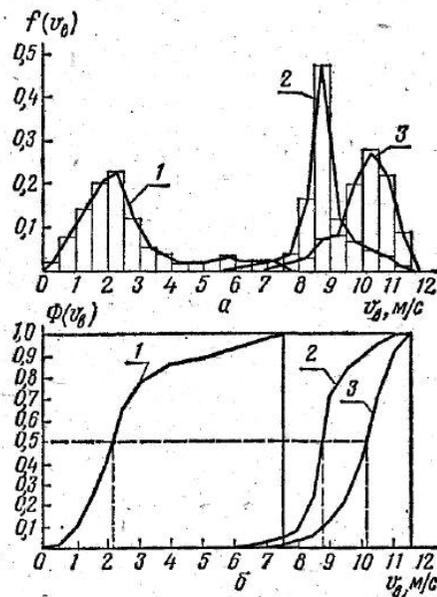


Рис. 6. Дифференциальные (а) и интегральные (б) полигоны распределения скоростей витания примесей и двух сортов зерна пшеницы:

1 — легкие (средненатурные) примеси; 2 — Безенчукская 98; 3 — Гиза 144.

Таблица 5. Вариационная таблица распределения скоростей витания легких (средненатурных) примесей

Границы интервала, м/с (номера фракций)	Середина интервала, м/с	Частота, $f(v_i)$	Накопленная частота, $\Phi(v_i)$	$v_i f(v_i)$
0,0—0,5 (1)	0,25	0,016	0,016	0,016
0,5—1,0 (2)	0,75	0,074	0,090	0,055
1,0—1,5 (3)	1,25	0,140	0,230	0,175
1,5—2,0 (4)	1,75	0,199	0,429	0,208
2,0—2,5 (5)	2,25	0,227	0,656	0,510
2,5—3,0 (6)	2,75	0,118	0,774	0,324
3,0—3,5 (7)	3,25	0,051	0,825	0,166
3,5—4,0 (8)	3,75	0,034	0,859	0,127
4,0—4,5 (9)	4,25	0,015	0,874	0,064
4,5—5,0 (10)	4,75	0,016	0,890	0,076
5,0—5,5 (11)	5,25	0,021	0,911	0,110
5,5—6,0 (12)	5,75	0,030	0,941	0,172
6,0—6,5 (13)	6,25	0,020	0,961	0,125
6,5—7,0 (14)	6,75	0,020	0,981	0,125
7,0—7,5 (15)	7,25	0,019	1,000	0,138

Примечание. Средневзвешенная скорость витания $v_{вт.ср.в} = \sum v_i f(v_i) = 2,7$ м/с.

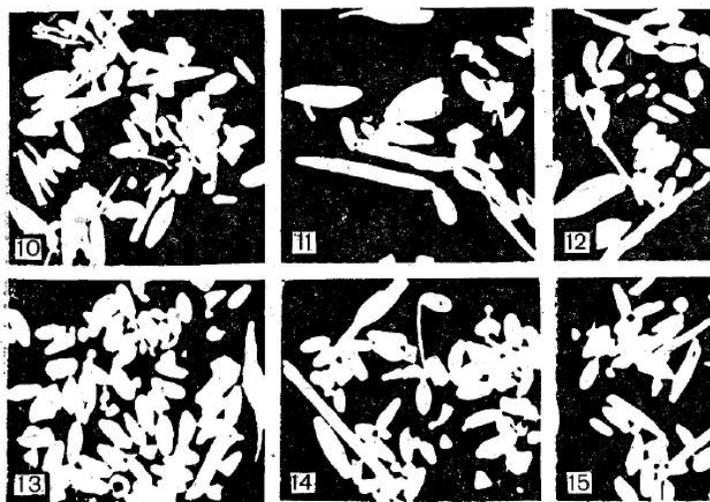


Рис. 7. Результаты воздушной классификации легких (средненатурных) примесей на 15 фракций в соответствии с вариационной таблицей распределения скоростей витания.

Н. И. Сыромятников предложил экспоненциальный закон распределения зерновок по высоте канала

$$\varepsilon = \varepsilon_0 e^{-Ah},$$

где ε — массовая концентрация материала на высоте h , кг/м³; ε_0 — массовая концентрация материала на нулевой высоте (на сетке); A — коэффициент, пропорциональный кинетической энергии частиц; h — высота исследуемого сечения, м.

Определение закономерности витания частиц и вскрытия причин, их порождающих, крайне важно, так как оно позволит обоснованно рассчитывать основные параметры сепарирующих устройств.

§ 3. Показатели технологической эффективности сепарирующих машин

При эксплуатации сепарирующих машин необходимо соблюдать рекомендуемый для данной операции режим и периодически контролировать работу машины. Для контроля отбирают образцы поступающей в машину зерновой смеси, очищенного зерна и полученных отходов.

Анализ отобранных образцов ведут на наборе лабораторных сит при помощи ручного просеивания и разборки или на лабораторных сепараторах.

Для оценки работы зерноочистительных сепараторов, пневмосепараторов, триеров, камнеотделительных машин и т. д. приняты в основном следующие показатели:

производительность (Q , кг/мин или т/ч) — количество поступающей зерновой смеси в машину в единицу времени;

эффект очистки зерна от примесей (E , %);

содержание полноценного зерна в отходах (a , %), характеризующее четкость сепарирования, т. е. качественную сторону процесса.

Производительность сепарирующей машины (Q , т/ч) определяют по результатам снятия баланса продуктов и выражают следующей зависимостью:

$$Q = \frac{Q_0 \cdot 60}{t \cdot 1000}, \quad (1)$$

где Q_0 — количество поступающей в машину зерновой смеси, кг; t — время снятия баланса, мин.

Эффект очистки зерна от примесей (E , %) выражают показателем эффективности, равным отношению количества отделенных примесей, обладающих определенными физико-механическими свойствами, к количеству этих же примесей, содержащихся в исходной зерновой смеси

$$E = \frac{B \left(1 - \frac{a}{100}\right)}{A} \cdot 100, \quad (2)$$

где B — количество выделенных примесей (масса отходов), кг; a — количество полноценного зерна в отходах, процент от их массы; A — содержание отдельных примесей в исходном зерне, кг.

Эффективность E сепараторов и содержание полноценного зерна в отходах a в процессе очистки регламентированы Правилами организации и ведения технологического процесса на мельницах. В частности, на первом сепараторном проходе эффективность очистки должна быть не менее 65%, а содержание полноценного зерна в отходах при всех видах очистки — не более 2%.

Технологические показатели работы рассевов. Эффективность сепарирования на рассевах обычно оценивают следующими показателями:

нагрузкой Q_0 — количеством исходной смеси, поступающей на машину в единицу времени;

количеством недосева ξ — относительным содержанием мелких проходовых фракций в продуктах, полученных сходом с сита;

коэффициентом извлечения $\eta_{из}$ — отношением количества извлеченного продукта к количеству той же фракции продукта, содержащегося в исходной смеси.

Состав исходной смеси при разделении на сходовый и проходовый продукты характеризуется относительным содержанием проходовой фракции (I , %)

$$I = \frac{P_0}{Q_0} \cdot 100, \quad (3)$$

где P_0 — количество проходовой фракции, кг.

Если при просеивании получено Π кг проходовой фракции и G кг сходовой фракции, то коэффициент извлечения $\eta_{из}$ можно определить по выражению $\eta_{из} = \frac{\Pi}{P_0}$ или, в процентах

$$\eta_{из} = \frac{\Pi}{P_0} \cdot 100, \quad (4)$$

а недосев $\xi = \frac{P_0 - \Pi}{G} = \frac{P_0 - \Pi}{Q_0 - \Pi}$, или, в процентах

$$\xi = \frac{P_0 - \Pi}{Q_0 - \Pi} \cdot 100. \quad (5)$$

Тогда связь между коэффициентом извлечения и коэффициентом недосева можно выражать (в долях от единицы) такими зависимостями:

$$\xi = \frac{1 - \eta_{из}}{\frac{1}{I} - \eta_{из}} \quad \text{и} \quad \eta_{из} = \frac{1 - \xi}{1 - \xi} \quad (6)$$

Эффективность работы рассевов в целом по мукомольному заводу характеризуется удельной нагрузкой, равной отношению суточной производительности мукомольного завода к общей площади просеивающей поверхности рассевов. При многосортных помолах пшеницы удельная нагрузка на рассевы ЗРМ установлена в пределах 630—800 кг/м²·сутки, а для рассевов типа ЗРШ — 900—1100 кг/м²·сутки.

Четкость сепарирования на ситах рассевов в большой мере зависит от гранулометрического состава исходной смеси и ее физико-механических свойств, удельной нагрузки, размеров ситового канала (площади и отношения длины к ширине), кинематических параметров (частоты и радиуса круговых колебаний), размеров отверстий сита, материала нитей и живого сечения единицы площади сита, способа очистки сит, способа перемещения продукта по ситам.

При большом содержании проходовой фракции в исходной смеси (например, контроль муки) общий эффект сепарирования ограничен процессом просеивания, и для его интенсификации необходимо обеспечивать определенную толщину слоя продукта на сите и кинематические параметры, при которых достигается оптимальная скорость движения нижнего слоя по ситам. При небольшом содержании проходовой фракции в исходной смеси (например, I драная система) общий эффект сепарирования ограничен процессом самосортирования, интенсивность которого увеличивается с уменьшением толщины слоя продукта и с уменьшением частоты колебаний при соответствующем увеличении радиуса круговых траекторий сита. При среднем содержании проходовой фракции в исходной смеси общий эффект сепарирования в начале сита ограничен процессом просеивания (если при поступлении исходной смеси на сито проходовая фракция равномерно распределена по толщине слоя), а в конце сита — процессом самосортирования.

Было установлено, что интенсивность просеивания при увеличении толщины слоя вначале повышается, достигая максимального значения при некоторой критической толщине. Дальнейшее увеличение высоты слоя ведет к уменьшению интенсивности просеивания. Для многих продуктов измельчения зерна оптимальная толщина находится в пределах $H_{ст} = 12—18$ мм ($H_{дин} = 15—24$ мм).

Размеры сит и ситовых каналов в большой мере определяют эффективность работы рассева. Для любой заданной площади просеивающей поверхности имеется оптимальное соотношение длины сита и его ширины, при котором достигается минимальная скорость подачи и максимальная эффективность сортирования. Например, для большинства промежуточных продуктов размолла зерна

при площади сит 0,25—0,34 м² оптимальное отношение длины сита к ширине равно двум. Наилучшие результаты при площади 0,32 м² были получены при размерах сит 400×800 мм.

При проектировании рассевов оптимальную толщину слоя на всех ситах обеспечивают параллельным и последовательным соединением сит.

Технологические показатели ситовеечных машин. Основные показатели технологической эффективности работы ситовеечных машин следующие:

производительность Q , определяемая количеством поступающего в машину обогащаемого продукта в единицу времени;

удельная нагрузка q обогащаемого продукта, кг на 1 см ширины сита в сутки;

изменение зольности продукта;

характеристика образца по классам крупности с указанием в процентах крупных, средних, мелких крупок и муки до и после обработки.

Сейчас на предприятиях распространены двухступенчатые ситовеечные машины типа ЗМС, удельные нагрузки для которых составляют: при обогащении крупной крупки 450—600 кг/сутки, средней крупки — 350—450, мелкой крупки — 275—350, жесткого дунста — 200—250 кг/сутки на 1 см ширины приемного сита верхнего яруса.

К основным факторам, влияющим на результаты обогащения крупок в ситовеечных машинах, относят степень однородности поступающей смеси, степень завершенности расщепления сростков, содержащихся в обогащаемой смеси, на основные анатомические части, скорость воздуха на отдельных участках сит и количество отсасываемого воздуха в целом из машины, а также условия эксплуатации.

Крупки, поступающие на обогащение, должны состоять в основном из частиц одинаковой крупности и быть однородными по качеству. Содержание мелких и крупных фракций в пределах группы крупок, перечисленных выше, не должно быть больше 25% в крупной крупке, 35% — в средней и 40% — в мелкой. Контролируют однородность крупок просеиванием на лабораторном расसेве навески массой 100 г на соответствующих крупочных ситах в течение 3 мин.

Более эффективное сортирование по качеству обеспечено тогда, когда эндосперм на оболочках в сростках не сильно деформирован и состоит из цельных крупных кусочков, а не из мелких или вмятых в оболочки на отдельных их участках. Этого достигают комплексом условий, связанных с подготовкой к помолу, помолом зерна, режимом работы драных и шлифовочных систем в соответствии с сортовыми особенностями зерна.

Эффект обогащения крупок в большой степени зависит от скорости восходящего потока воздуха и равномерности распределения его по ситовой поверхности.

На результат обогащения крупок в ситовеечных машинах влияют также частота и амплитуда колебаний ситового корпуса, угол наклона сита к горизонтали, угол наклона подвесок к вертикали.

Ситовеечные машины обычно работают со следующими кинематическими параметрами ситового корпуса: число колебаний в минуту $n = 500—550$ при амплитуде $A = 5,5$ мм. Оптимальные величины A и n для различных по крупности и качественному составу смесей частиц зерна неодинаковы.

Оптимальные параметры для мелкой крупки: $A = 12$ мм и $n = 570$ колебаний в минуту, в то время как просеивание крупной крупки с такой амплитудой еще продолжает увеличиваться при значении $n > 570$ колебаний в минуту.

С уменьшением α (угла наклона сита к горизонтали) замедляется движение частиц вдоль сита, но увеличивается количество просеивающихся частиц. Обычно угол $\alpha = 1—1,5^\circ$. С увеличением β (угла наклона подвесок к вертикали) количество просеивающихся крупок увеличивается. В выпускаемых ситовеечных машинах угол β не более 10° .

Для оперативного контроля ситовеечных машин определяют количество продуктов, поступающих проходом через сита первой ступени на вторую, $P_{2ст}$, т. е. на нижний ярус сит, в процентах к нагрузке P_0 на заданную систему ситовеечной машины. Определяют это снятием общей нагрузки на один прием ситовеечной машины P_0 в минуту, суммы проходовых фракций нижнего яруса $P_{пр}$ и сходов нижнего яруса $P_{сх}$

$$P_{2ст} = \frac{P_{пр} + P_{сх}}{P_0} \cdot 100. \quad (7)$$

Для крупки 1-го качества величина $P_{2ст}$ находится в пределах 50—55%, для крупки 2-го качества — на уровне 40—50%.

Эффективность крупотделительных машин. Переработка крупных культур, и особенно пофракционная, нуждается в тщательном отборе крупы из продуктов шелушения. Большие недосевы перегружают шелушительные системы и ухудшают качество готового продукта. Технологическую эффективность крупотделения оценивают коэффициентами извлечения и недосева по формулам, аналогичным таковым для процесса сепарирования на рассевах.

Чтобы рассмотреть эффективность процесса сепарирования в связи с процессом шелушения для оценки процесса в целом, в практике эксплуатации используют коэффициент извлечения $\eta_{и}$ с учетом эффективности шелушения. Коэффициент извлечения $\eta_{и}$ в этом случае определяют по формуле

$$\eta_{и} = \frac{\eta_{ш} - \beta}{1 - \beta}, \quad (8)$$

где $\eta_{ш} = \frac{K_1 - K_2}{K_2}$ — коэффициент шелушения (в долях единицы), определяемый по количеству нешелушенных зерен; β — содержание крупы (в долях еди-

ницы) в зерновом сходе крупноотделительной машины; K_1 — процент нешелушенных зерен в составе фракции, поступившей на станок; K_2 — процент нешелушенных зерен в данной фракции после шелушения.

Обычно при нормальном протекании процесса недосев составляет 5—6% в сходах первых систем и до 20—25% — в сходах последних систем.

Такой подход к оценке эффективности позволяет получить более ясную картину о циклообороте продукта с учетом эффективности шелушения и крупотделения.

В этом случае коэффициент циклооборота $K_{ц}$ представляет собой величину, обратную коэффициенту извлечения $\eta_{и}$

$$K_{ц} = \frac{1}{\eta_{и}} = \frac{1-\beta}{\eta_{ш}-\beta} \quad (9)$$

Обычно, например, при обработке гречихи коэффициент шелушения не превышает 0,60—0,65, коэффициент недосева 0,05. В этом случае извлечение по данной методике составляет 0,58—0,63, а циклооборот колеблется в пределах 1,5—1,7. В реальных условиях циклооборот составляет 2,4—2,5, а на последних системах достигает 15—20.

Таким образом, для снижения циклооборота необходимо не только интенсифицировать процесс шелушения, но и совершенствовать процесс последующего сепарирования продуктов шелушения.

§ 4. Основные требования к сепарирующим машинам

Наряду с основным требованием — высокой технологической эффективностью, включая качество конечных продуктов и сокращение их потерь, к сепарирующим машинам зерноперерабатывающих предприятий, так же как и ко всем машиностроительным изделиям, предъявляют ряд требований, обуславливающих надежную работу машин при невысоких эксплуатационных затратах. Наиболее важные из них следующие: экономическая эффективность машин; надежность и технологичность конструкций; соответствие требованиям эргономики, нормам промышленной санитарии, противопожарной техники и техники безопасности. Особое место среди этих требований занимают стандартизация, нормализация, унификация и агрегатирование машин. Все большие требования предъявляют к повышенной заводской готовности машин, системам управления и автоматизации, а также к соответствию машин требованиям промышленной эстетики.

Эти общие требования в достаточной степени освещены в технической литературе, поэтому в данной книге мы остановимся только на некоторых из них применительно к сепарирующим машинам.

Экономическая эффективность. Высокая экономическая эффективность машины в целом обеспечивается прогрессивным рабочим

процессом, высокой производительностью, прочностью и надежностью, технологичностью изготовления и сборки, низкими металлоемкостью, массой, энергоемкостью и эксплуатационными затратами, высоким ресурсом и степенью механизации и автоматизации, простотой и безопасностью обслуживания, удобством управления.

Конструкторы часто стремятся к снижению стоимости машины и добиваются экономии только в одном направлении, не замечая других, гораздо более эффективных путей повышения экономичности и забывая о том, что частная экономия, без учета совокупности всех перечисленных факторов, нередко приводит к снижению суммарной экономической эффективности.

Рентабельность машины q определяется отношением полезной отдачи (выработки) Q машины за определенное время, выраженной в рублях, к сумме расходов S (руб.) за тот же период

$$q = \frac{Q}{S} \quad (10)$$

Под полезной отдачей понимают стоимость продукции, вырабатываемой машиной (стоимость готовых изделий, полуфабрикатов, промежуточных операций, полезной работы, выполняемой машиной). Сумма расходов S в общем случае складывается из стоимости: амортизации машины A , потребляемой энергии \mathcal{E} , потребляемых материалов M , рабочей силы C , технического обслуживания O , накладных расходов H , ремонтных работ P и общезаводских амортизационных начислений A_3 , т. е.

$$S = A + \mathcal{E} + M + C + O + H + P + A_3.$$

Величина q должна быть больше единицы, иначе машина будет работать убыточно.

Годовой экономический эффект E от работы машины равен разности выработки Q и суммы годовых расходов S

$$E = Q - S = Q \left(1 - \frac{S}{Q} \right) = Q \left(1 - \frac{1}{q} \right). \quad (11)$$

Суммарный экономический эффект ΣE за весь срок службы машины соответственно равен разности суммарной выработки машины ΣQ и суммарной величины расходов ΣS за период службы

$$\Sigma E = \Sigma Q - \Sigma S = \Sigma Q (\Sigma A + \Sigma \mathcal{E} + \Sigma M + \Sigma C + \Sigma O + \Sigma H + \Sigma P + \Sigma A_3). \quad (12)$$

Экономичность машины тесно связана с интенсивностью ее использования в эксплуатации, характеризуемой коэффициентом использования машины

$$\eta_{и} = \frac{h}{H},$$

где H — срок службы машины; h — длительность фактической работы машины за весь период ее эксплуатации.

Если предположить, что машина работает до полного истощения ее физического ресурса, то очевидно, что h — это долговечность машины. В уравнении (12) некоторые слагаемые пропорциональны сроку службы машины: $\Sigma P = HP$; $\Sigma A_3 = HA_3$, другие же слагаемые пропорциональны долговечности и соответственно равны: $\Sigma Q = hQ$; $\Sigma \mathcal{E} = h\mathcal{E}$; $\Sigma M = hM$ и т. д.

Стоимость амортизации за весь период службы равна стоимости машины: $\Sigma A = C_m$.

С учетом сказанного преобразуем уравнение (12)

$$\Sigma E = hQ - [C_m + h(\mathcal{E} + M + C + O + H) + H(P + A_3)].$$

Обозначив расходы, пропорциональные долговечности машины h через S' , а расходы, пропорциональные сроку службы H , через S'' , получим

$$\Sigma E = hQ - (C_m + hS' + HS'') = hQ - \left[C_m + h \left(S' + \frac{H}{h} S'' \right) \right].$$

С учетом коэффициента использования машины $\eta_{и}$:

$$\Sigma E = h \left(Q - S' - \frac{1}{\eta_{и}} S'' \right) - C_m.$$

Суммарный экономический эффект в функции срока службы машины H равен

$$\Sigma E = H[\eta_{и}(Q - S') - S''] - C_m. \quad (13)$$

Срок окупаемости машины $H_{ок}$ определяется из условия равенства суммарного экономического эффекта и стоимости машины ($\Sigma E = C_m$)

$$H_{ок} = \frac{2C_m}{\eta_{и}(Q - S') - S''}. \quad (14)$$

Нормативный срок окупаемости сепарирующих машин зерноперерабатывающих предприятий установлен равным 3 годам. Практически эффективность вновь разрабатываемых машин достаточно высока, и срок окупаемости, как правило, не превышает двух лет.

В расчетах экономической эффективности часто используют понятие коэффициента эксплуатационных расходов K , представляющее собой отношение суммы расходов за период службы машины к ее стоимости

$$K = \frac{\Sigma S}{C_m} = \frac{C_m + h \left(S' + \frac{1}{\eta_{и}} S'' \right)}{C_m}. \quad (15)$$

Коэффициент K , как правило, значительно больше единицы и находится в пределах 10—100. Из выражения (15) видно, что коэффициент эксплуатационных расходов K повышается с увеличением долговечности h .

Соответственно снижается доля стоимости машины в общей сумме расходов.

Снижение стоимости машины существенно влияет на экономический эффект только при малых сроках службы. Так, уменьшение стоимости машины вдвое, вызывающее при $H = 2,5$ года увеличение эффекта на 20,5% при сроке службы свыше 10 лет, повышает его только на 3—1%.

Большинство сепарирующих машин работает на трехсменном режиме с числом рабочих дней в году около 300, и, следовательно, долговечность их приближается к сроку службы (коэффициент использования $\eta_{и} = 0,85—0,90$). Срок службы машин, несмотря на высокий коэффициент использования, определяется до 10 лет. Таким образом, для сепарирующих машин первоначальная их стоимость, не определяющая в расчете их эффективности, и увеличение стоимости машин, направленное на повышение их долговечности, вполне оправдано. Так, увеличение стоимости машины в 1,5 раза при долговечности ее, равной 6 годам, снижает экономический эффект на 2%, а повышение долговечности на год увеличивает экономический эффект в 2—3 раза.

Следует также учесть, что повышение долговечности сопровождается увеличением численности машинного парка, уменьшением строительно-монтажных работ и повышением эффективности производства в целом.

Снижение стоимости обслуживания машины существенно увеличивает экономический эффект. Так, уменьшение этой статьи на 30% увеличивает экономический эффект в 9 раз при $h = 4$ годам. Очень эффективно повышение производительности машины и особенно совершенствование машин с одновременным увеличением их производительности и снижением затрат на обслуживание. Например, при увеличении долговечности в 6 раз и производительности вдвое с одновременным снижением затрат на обслуживание на 30% экономический эффект при $H = 10$ годам возрастает в 36,5 раза.

Расчеты экономической эффективности в процессе создания машины согласно нормативным материалам нужно проводить на следующих основных стадиях.

1. Предварительный расчет — на предпроектной стадии, одновременно с разработкой технического задания по укрупненным показателям для того, чтобы обосновать экономическую целесообразность проектирования данной машины и ориентировочно определить размер ожидаемого экономического эффекта.

2. Уточненный расчет — по результатам испытаний опытного образца с анализом всех технико-экономических данных, полученных в процессе испытаний. Данные расчета уточняют сумму предпола-

гаемого экономического эффекта, определяющего экономическую целесообразность серийного производства машины.

Расчеты, как правило, носят сравнительный характер с анализом материальных и трудовых затрат на создаваемую машину и наиболее совершенную отечественную или зарубежную конструкцию, применяемую на предприятиях. Для определения общей годовой экономии принимают выпуск машин, запланированный на второй год серийного производства. Исходные данные для расчета сводят в таблицу, где по обоим сравниваемым машинам приводят следующее: производительность, количество обслуживающего персонала, массу, размеры и стоимость, занимаемую площадь, потребляемую мощность, технологическую эффективность, выход продукции и т. д.

Наиболее сложно определять стоимость машины при предполагаемом ее серийном изготовлении. В практике расчетов эффективности пищевых машин используют три способа: определение стоимости машины по аналогии с выпускаемыми; расчетный — по затратам сырья, материалов и рентабельности изготовления с использованием методических материалов; по укрупненным показателям стоимости 1 кг массы машин различной сложности.

В подавляющем большинстве случаев сопоставление затрат бывает вполне достаточным для определения экономического эффекта. В том случае, когда новая машина резко отличается от заменяемой размерами или значительно сокращает производственные площади, необходимые для установки другого технологического оборудования, следует провести сравнительный анализ расходов на амортизацию, ремонт и содержание помещений и учесть их в окончательной формуле определения годового экономического эффекта.

Для многих сепарирующих машин (рассеивов, ситовечных) часто проводят расчет по себестоимости обработки единицы продукции на комплекс машин, обслуживающих полностью данную технологическую операцию процесса новыми и заменяемыми машинами с подсчетом расходов по всем статьям затрат, связанных с капитальными вложениями и эксплуатацией. Расчеты по такой схеме более трудоемки, но результаты их дают более точное представление об экономической эффективности сепарирующих машин и, что особенно важно, при комплексном их внедрении на предприятии.

Для сепарирующих машин, основное назначение которых — очистка или разделение на фракции пищевых и других сыпучих продуктов, при расчете экономической эффективности анализируют все трудовые и материальные затраты по новой и сравниваемой машине и относят их к единице обрабатываемой продукции.

Иногда проводят комплексный расчет из условий замены всего парка машин новыми для предприятия машинами типовой производительности. Как правило, эффективность сепарирующих машин выражают повышением производительности и качества разделения. Бывает удобно объединить эти показатели и вести расчет затрат на полученную условную единицу. В сепарирующих машинах очис-

тительного назначения в качестве такой условной единицы в последнее время применяют производительность в тонно-процентах, определяемую как произведение часовой производительности в тоннах на процент выделения примесей за один пропуск продукта через машину. По такой методике удобно рассчитывать эффективность машин очистительного типа: зерновых сепараторов, пневмосепараторов, триеров, магнитных сепараторов и других.

Требования промышленной санитарии и техники безопасности. Решающие показатели, которые нужно учитывать при конструировании новых машин, — это уровень повышения производительности труда, степень его облегчения и безопасности. Для предотвращения несчастных случаев конструкция машин должна отвечать ряду требований. Управление и обслуживание машины должны быть в максимальной степени механизированы и автоматизированы, что позволяет устранить большую физическую нагрузку, травмирующие и утомляемость обслуживающего персонала при выполнении технологических операций, при пуске и остановке.

При проектировании новых машин, аппаратов и модернизации действующих особое внимание нужно обращать на мероприятия, максимально снижающие шум и вибрацию технологического оборудования.

Зерноочистительные и просеивающие машины хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятий имеют колеблющиеся и вращающиеся органы, которые представляют собой источники вибрации на производстве.

Вибрации машины и ее узлов через опоры передаются на перекрытия и оказывают вредное воздействие на обслуживающий персонал. Кроме того, вибрация порождает ряд факторов, вредных или опасных для обслуживающего персонала: шум, ускоренный износ машин и их поломку, а также аварии.

Вредное воздействие вибраций возрастает с увеличением частоты колебаний. Особенно вредными могут оказаться вибрации с частотой 25—90 Гц. Наиболее неблагоприятно воздействуют на человека вертикальные вибрации. В таблице 6 приведены предельно допустимые величины общей вибрации на производстве.

Для соблюдения установленных норм общих вибраций предусмотрено нормирование вибраций самих машин.

Нормы вибраций зерноочистительных и просеивающих машин приведены в таблице 7.

Основные причины вибраций — это неуравновешенность колеблющихся или вращающихся масс, а также недостаточно точная установка машин и ошибки в выборе и расчете оснований и фундаментов. При расчете перекрытий зданий учитывают коэффициент динамичности машины (табл. 8).

Для машин с колебательным движением рабочих органов (сепараторы, ситовечные машины, вибротранспортеры) наиболее эффективное средство борьбы с вредными вибрациями — это применение сдвоенных рабочих органов, колеблющихся навстречу друг

Таблица 6. Предельно допустимые величины общей вибрации на производстве

Частота		Амплитуда, мм
Гц	колебаний в минуту	
До 3	До 180	0,600—0,400
3—5	180—300	0,400—0,150
5—8	300—480	0,150—0,050
8—15	480—900	0,050—0,030
15—30	900—1800	0,030—0,009
30—50	1800—3000	0,009—0,007
50—75	3000—4500	0,007—0,005
75—100	4500—6000	0,005—0,003

Таблица 7. Нормы вибраций зерноочистительных и просеивающих машин

Машины	Предельно допустимая амплитуда, мм	Место замеров величин вибраций
Сепаратор и ситовечные: с эксцентриково-шатунным приводом	0,25—0,30	Стойки станины машины на высоте 1 м от пола
с самобалансным приводом	0,10—0,13	Стойки станины машины на высоте 1 м от пола
с эксцентриковым дезаксильным механизмом привода (двухкорпусные)	0,15—0,25	То же
Крупосортировочные	0,25	Верхний конец стоек
Падди-машины	0,15	Главная рама
Рассевы самобалансирующиеся веретенные	0,13	Нижний конец веретена
Камнеотделительные марок ЗК-15М, ЗКГ	0,15	То же
Триеры: дисковые	0,15	Станина у подшипников главного вала
цилиндрические быстросходные	0,15	Станина на высоте 1 м от пола
Пневмосепараторы	0,10	Кожух машины на высоте 1 м от пола

другу (в противофазе) и взаимно уравнивающимися. Для однокорпусных машин при использовании в качестве возбудителей колебаний самобалансных механизмов (вibratorов) жесткость упругих подвесок (стоек) должна быть по возможности небольшой, что обеспечивает минимальную передачу вибраций основанию.

Для уравнивания вращающихся деталей и узлов машин их балансируют, а для уменьшения передачи вибраций от машин к перекрытию все больше применяют виброизоляцию. Этот способ рекомендуют применять для среднечастотных машин с частотой вращения (колебаний) свыше 500 в минуту и особенно для высоко-

Таблица 8. Коэффициенты динамичности для различных сепарирующих машин

Оборудование	Коэффициент динамичности
Сепараторы: ЗСМ-5; ЗСМ-10; ЗСМ-20	1,2
Дисковые триеры: ЗТК-5И; ЗТО-5И	1,2
Камнеотделительные машины: ЗКГ; ЗК-15М	1,3
Рассевы: ЗРШ-1-4; ЗРШ-4М; ЗРМ; ЗРШ-6; ЗРШ-6М	1,3
Ситовечные машины: ЗМС-2; ЗМС-2-4; ЗМС-1-4	1,2
Центробежный бурат ЗЦБ	1,2
Крупосортировочная машина КСЗ-2	1,3

частотных машин с частотой вращения более 2000 колебаний в минуту.

Важное мероприятие для создания хороших условий труда — это борьба с шумом. Все шумы в зависимости от их частотного состава (спектра) разделяются на три класса: низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные. Допустимые уровни шума для каждого класса приведены в таблице 9.

Таблица 9. Допустимые уровни шума (дБ) на производстве для шумов различных классов

Класс	Характеристика шума	Допустимый уровень
1	Низкочастотные шумы (шумы тихоходных агрегатов неударного действия; шумы, проникающие сквозь звукоизолирующие преграды — стены, перекрытия, кожухи) — максимальные уровни в спектре расположены ниже частоты 300 Гц, выше которой уровни понижаются (не менее чем на 5 дБ на октаву)	90—100
2	Среднечастотные шумы (шумы большинства машин, станков и агрегатов неударного действия) — максимальные уровни в спектре расположены ниже частоты 800 Гц, выше которой уровни понижаются (не менее чем на 5 дБ на октаву)	85—90
3	Высокочастотные шумы (звенящие, шипящие и свистящие шумы, характерные для агрегатов ударного действия, потоков воздуха и газа, агрегатов с большими скоростями рабочих органов) — максимальные уровни в спектре расположены выше частоты 800 Гц	75—85

При проектировании новых машин необходимо предусматривать мероприятия, снижающие шум на рабочих местах вблизи агрегата до уровней, не превышающих допустимые. Для ослабления шума

машин следует по возможности заменять ударные действия безударными, использовать вращательное движение деталей агрегата вместо возвратно-поступательного, уменьшать интенсивность вибраций деталей агрегатов, имеющих большие излучающие шум поверхности (корпусов, кожухов, крышек и т. д.), путем облицовки последних материалами, демпфирующими вибрации, и устройства гибких связей (упругих прокладок, пружин) между этими деталями и узлами агрегата, возбуждающими вибрации. Снижение уровня шума возможно также при помощи демпфирования вибрации соударяющихся деталей и отдельных узлов агрегата путем сочленения их с материалами, имеющими большое внутреннее трение: резиной, пробкой, битумом, асбестом, битумными картонами и войлоком. Необходимо предусматривать тщательное уравнивание (статическое и динамическое) всех движущихся деталей машин, смазывать соударяющиеся детали вязкими жидкостями и заключать в жидкостные масляные ванны вибрирующие и издающие шум детали (шестеренчатый редуктор и т. д.), предусматривать минимальные допуски при изготовлении и сборке деталей агрегата для уменьшения зазоров в сочленениях деталей и энергии соударений.

Снижения шума достигают также амортизацией вибрации, устройством упругих прокладок, пружин между деталями и узлами, возбуждающими колебания, изготовлением зубчатых колес из пластмасс, прессованного волокна, нейлона и т. д.

Составная часть ряда сепарирующих машин — это вентиляторы, аэродинамический шум которых может превышать допустимый. Высокочастотный шум вентилятора неприятно действует не только на обслуживающий персонал, но и на людей, живущих вблизи предприятия. Для уменьшения шума вентилятора применяют различные типы глушителей: трубчатые, коробчатые, из пористых материалов и другие.

Наиболее удобен трубчатый глушитель, устанавливаемый в воздухопроводе как можно ближе к вентилятору. В качестве звукопоглощающих материалов в глушителях применяют антипирированную хлопчатобумажную вату, шлаковату, минеральный войлок, капроновое волокно и т. д.

Элементы технической эстетики и компоновки машин. Требования технической эстетики определяют основные задачи конструкторов по созданию машин и других промышленных изделий, удобных в управлении и эксплуатации, целостных по форме, эстетически совершенных и одновременно обладающих высокими технико-экономическими показателями.

Форма машины и ее эстетическое совершенство тесно связаны с функциональным назначением данной машины, особенностями ее конструктивного исполнения, применяемыми материалами и технологией производства [11].

Работа над технической эстетикой машины выходит далеко за пределы «художественного оформления» и включает следующие основные задачи:

рациональность общей компоновки машины, оптимальное взаимное расположение ее узлов и эстетическое внешнее оформление, при которых функция машины наиболее ярко выражена;

разработку систем и органов управления, включая компоновку, а в отдельных случаях и конструирование приборов контроля и управления в строгом соответствии с антропометрическими и физиологическими данными человека;

выбор и рекомендации декоративных покрытий и их сочетания в соответствии с назначением машины;

разработку эмблем, товарных знаков, паспорта, рекламных проспектов, инструкций, поясняющих и предупреждающих шильдов, связанных с особенностями эксплуатации машины.

Как уже было отмечено, компоновка и форма машины определены ее функциональным назначением, в связи с чем уже на первой стадии компоновочных работ машины должен участвовать художник-конструктор, который, владея определенными закономерностями целостной организации объемно-пространственной структуры, правильно используя закономерности тектоники и средства композиции (масштабность, ритм, пропорции, контраст и другие) внесет необходимые решения в конструкцию, улучшающие художественно-эстетическое оформление будущей машины.

Под рациональностью формы следует понимать не только максимальную логичность конструкции, остроумность компоновки и высокую технологичность ее элементов, но также и психофизиологические факторы ее влияния на человека и архитектурно-художественные приемы, обеспечивающие положительное эмоциональное воздействие на рабочего, т. е. красота машины состоит не во внешнем ее оформлении, полученном приемами стилизации, а в самом замысле, в остроумном решении конструкции, в красоте инженерной идеи.

Архитектоника машины определяется оптимальной компоновкой всех ее узлов, подчеркивающей логику ее построения и рабочего процесса. Форма станка не должна выражать идею скоростного полета, а городской трамвай не обязан быть решенным в обтекаемых формах, как, например, судно на подводных крыльях.

В современном машиностроении наметилась тенденция к геометризации форм, продиктованная применением наиболее рациональных технологических приемов изготовления, снижающих себестоимость изделия. Однако не всегда, пользуясь «модным направлением», можно соблюсти принцип единства формы и функции машины — основного требования промышленной эстетики.

Тем не менее современная форма машин имеет более простое и строгое решение, появляется угловатость, большое количество гладких чистых прямолинейных поверхностей, лишенных всякого рода приливов и других вынужденных технологических излишеств.

Примерно так же сегодня решают и форму сепарирующих машин зерноперерабатывающих предприятий. В течение последних лет большинство машин было переведено на цельнометаллическое

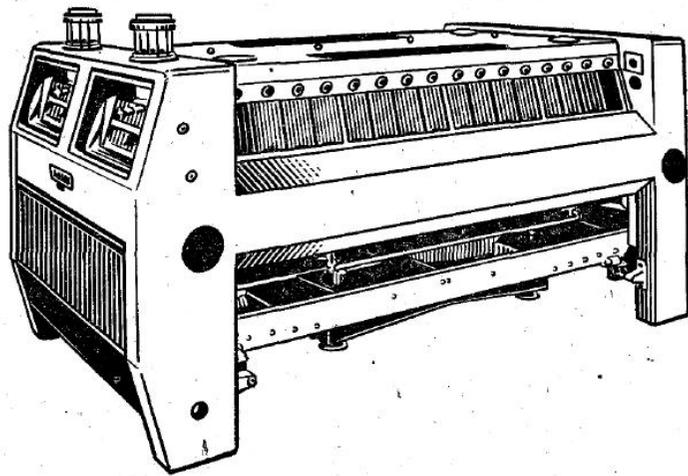


Рис. 8. Ситовая машина швейцарской фирмы «Бюлер».

исполнение с применением специальных профилей для несущих конструкций (станин) и гладких листовых материалов для рабочих органов и защитных устройств. Получает распространение увеличенное остекление машин (рис. 8) с подсветкой, значительно улучшающее их внешний вид и удобство доступа при эксплуатации. Однако форма многих сепарирующих машин не отвечает их функциональному назначению и эстетическим требованиям. На рисунке 9 показаны ситовая машина английской фирмы «Генри Саймон» (а) и электромагнитный сепаратор ЭМ-101 (б). Обе машины имеют неудачную форму и внешнее конструктивное решение как с точки зрения архитектоники, так и удобств в эксплуатации, а также наличие ряда выступающих частей, неудачное использование габаритного объема, неоправданные пустоты. Неудачное эстетичес-

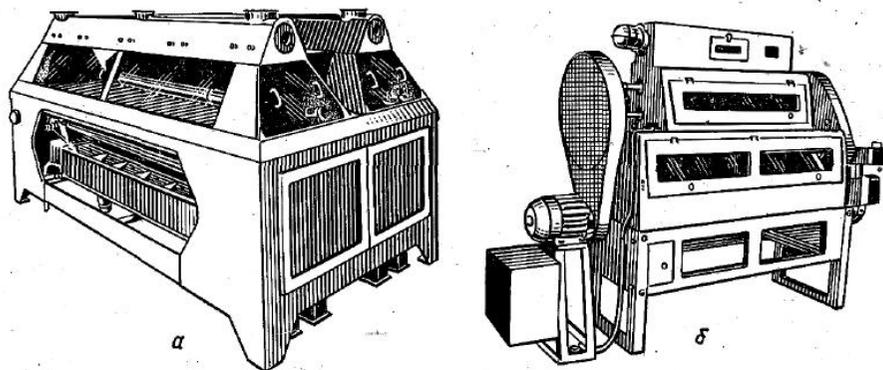


Рис. 9. Ситовая машина английской фирмы «Генри Саймон» (а) и электромагнитный сепаратор ЭМ-101 (б).

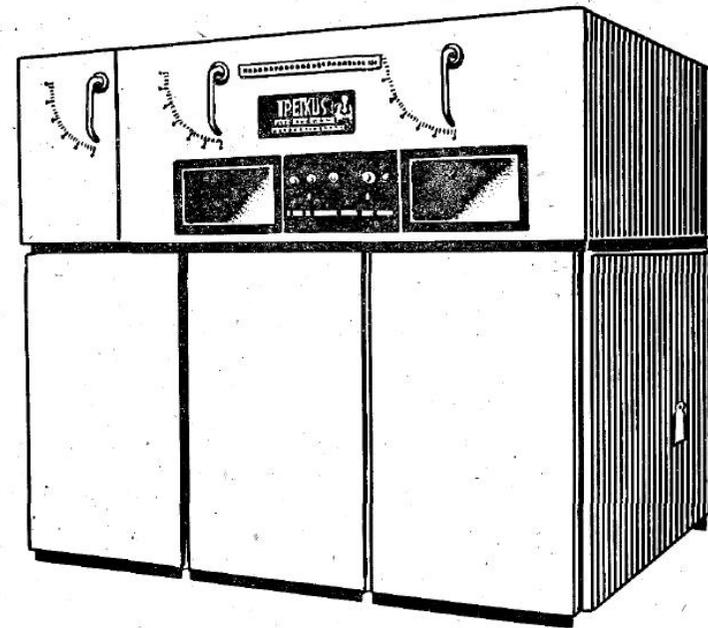


Рис. 10. Зерноочистительный сепаратор фирмы «Петкус», ГДР.

кое решение имеет и осветительная сигнализация у электромагнитного сепаратора. Намного лучше с точки зрения требований промышленной эстетики решена машина того же функционального назначения (см. рис. 8).

Эта ситовая машина имеет рациональную форму, удачный внешний контур, в ней хорошо использован габаритный объем. В данной машине удачно сочетаются возможности визуального наблюдения за процессом и удобство эксплуатации, здесь нет лишних кожухов и ограждений. Все защитные устройства решены в замыкании основного корпуса машины. Следует учесть, что различные защитные и предохраняющие кожухи существенно влияют на формирование машины. Удачные их решения, гармонично вписывающиеся в общую архитектуру машины, улучшают ее эстетические качества. Однако общее правило говорит о необходимости применять различные кожухи только в тех случаях, когда это действительно необходимо, т. е. когда нужно предохранить машину от порчи или человека от возможной травмы. Некоторые конструкторы иногда стараются закрыть кожухами все детали, уязвимые с точки зрения «красоты», но это неудачное решение.

Пример такого неудачного решения — это конструкция зерноочистительного сепаратора фирмы «Петкус», ГДР (рис. 10). Конструктивное решение машины с большим количеством прямоугольных капотов превратило ее в своеобразный ящик, где с точки зрения эстетики потеряна связь формы с функциональным назначением машины и, кроме того, усложнена ее эксплуатация.

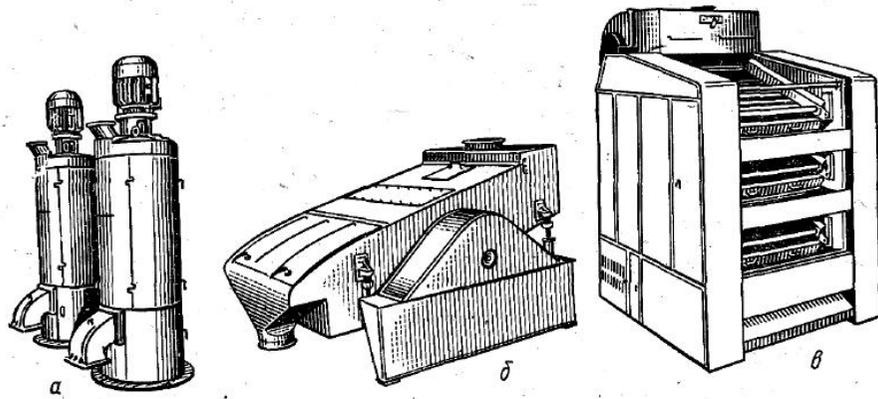


Рис. 11. Сепарирующие машины:

а — вымольная ЗВО-1; б — ситовой вибросепаратор фирмы «Миаг», ФРГ; в — воздушно-ситовой вибросепаратор объединения «Нагема», ГДР.

Примерами более удачного решения формы машины, рациональности компоновки могут служить вымольная машина ЗВО-1 (а), вибрационный ситовой сепаратор фирмы «Миаг» (б) и вибрационный воздушно-ситовой сепаратор фирмы «Нагема» (в) (рис. 11).

В вымольной машине ЗВО-1 четко просматриваются целесообразная компоновка узлов, эффективно использующая габаритный объем; свободный доступ к основным рабочим органам через большие люки, удачно вписывающиеся в корпус машины; компактное сочленение приводного двигателя с бичевым барабаном. Правильный конструктивный подход позволил успешнее отработать и внешнее оформление машины. В вибросепараторе «Миаг» внешняя форма хорошо гармонирует с рабочими органами, обеспечен легкий доступ к узлам машины. В сепараторе «Нагема» на первый взгляд несколько массивными кажутся боковины станины, где смонтирована подвесная система рабочего корпуса и скрыты дебалансные грузы вибратора. Эти места не нуждаются в периодическом доступе и снабжены люками. Наиболее часто в сепараторах приходится оперировать с ситами и механизмами их очистки. Здесь этот вопрос решен очень удачно. Торец машины открыт благодаря объединению пневмосепарирующих каналов первой и второй продувки и размещению их с другого торца. Форма машины оригинальна: в ней нет традиционного решения для зерновых сепараторов в сочетании решетчатых корпусов и пневмоканалов и в то же время обеспечено не меньшее удобство в обслуживании; архитектура машины увязана с функциональным ее назначением.

Компоновка и конструктивное решение органов управления и приборов контроля, характеризующих отношения человека и машины, определяемые понятием «контур регулирования», имеют существенное значение в общем вопросе промышленной эстетики и главным образом в удобстве эксплуатации машин. Контур регули-

рования состоит из двух звеньев: живого организма (человека) и механического исполнительного устройства (машины). Физическое соприкосновение рабочего с органами управления машиной дает ряд осязательных и других раздражений: 90% получаемой информации воздействует на зрение и 10% — на другие органы чувств. Размещать органы управления нужно в удобной рабочей зоне без лишних шумовых и световых помех. Скрежет, стук, вибрация механизмов, блики света, яркая окраска, неправильное освещение раздражающе действуют на рабочего-оператора.

Кнопочные станции следует располагать под левую руку оператора, что освобождает более работоспособную правую руку для операций, нуждающихся в большем усилии. Кнопки или клавиши располагают в соответствии с последовательностью пуска. Располагать контрольные лампы нужно в функциональной связи с соответствующими органами управления. Поясняющие надписи нужно тщательно продумать и скомпоновать, следует также избегать лишних надписей. Надписи располагают таким образом, чтобы оператор не мог двояко истолковать их и ошибиться.

Управляют сепарирующими машинами, как правило, с общих пультов — дистанционно, поэтому приборы электроуправления и контроля komponуют из стандартной электроаппаратуры и решают в виде панелей или пультов управления всем комплексом технологического оборудования предприятий.

К органам управления и регулировки на самих сепарирующих машинах в основном относят рычажные и винтовые системы управления с рукоятками и маховиками для изменения следующего: удельной массовой подачи, аэродинамического режима, равномерности питания, конструктивно-установочных параметров рабочего органа и т. д. Они должны быть выполнены достаточно удобными для оператора, соответствующими размерам и не требовать чрезмерно большого усилия; размещать их необходимо в безопасной зоне. При установке механизмов регулирования, нуждающихся в больших усилиях, например регулирование положения шнекового желоба в триере при помощи червячного механизма, к машине должен прикладываться специальный или стандартный инструмент. Механизмы, требующие многопозиционного регулирования, нужно снабжать градуированными шкалами с обозначениями крайних положений регулирующих органов. На рисунке 9 хорошо видны механизмы регулирования воздушного режима ситовечной машины по длине ситового корпуса, решенные в виде рычажно-винтовой системы с выносом маховичков на верхнюю панель аспирационной камеры, непосредственно над смотровыми люками, в которые можно визуально наблюдать результаты регулирования. Такое решение отвечает требованию, предъявляемому к органам управления и контролю, о их совместимости для удобства получения информации от регулирования.

Цветовое решение, окраска и отделка машин — это сильные средства эстетического воздействия на человека. Правильным вы-

бором цвета окраски предметов, окружающих человека на производстве, можно снизить утомляемость, предохранить рабочего от опасности, создать бодрое настроение.

Окраска изделий машиностроения преследует две основные цели: создать защитное покрытие, предохраняющее машину от коррозии, способствовать раскрытию сущности изделия, подчеркнуть его тектонику, связать с окружающей средой. Кроме этого, цветовое решение машин имеет декоративное значение, оно эмоционально воздействует на человека.

При решении формы машины большое значение имеют такие приемы окраски, как деление на главную и второстепенную части, выделение рабочей зоны, зрительное уравнивание объемов и другие. Приемами окраски можно зрительно снизить высоту изделия или удлинить его, создать иллюзию легкости либо монументальности. Наши глаза физиологически приспособлены к восприятию многоцветности, длительное восприятие одного цвета приводит к цветовому утомлению. Поэтому необходимо обеспечить возможность рабочему временно переключаться на восприятие противоположной группы цветов.

Было установлено, что у большинства людей выработались условные рефлексы на ряд цветов и цветовых сочетаний. Яркие цвета ассоциируются с понятием опасности, повышают и сосредотачивают внимание, в них окрашивают травмоопасные детали и зоны, требующие повышенного внимания.

Разработаны общие рекомендации к окраске изделий машиностроения, приемлемые и для сепарирующих машин. Сущность их сводится к следующему.

1. Крупногабаритные машины, форма которых образована однородными по структуре плоскостями, рекомендуется расчленять цветом, что способствует зрительному уменьшению объемов. Окрашивать их следует в легкие малонасыщенные тона для предотвращения утомляющего действия цвета.

2. Небольшие по размеру изделия не следует расчленять цветом, чтобы не нарушать масштабности их восприятия. Их целесообразнее окрашивать целиком, применяя в зависимости от требований рабочей среды любые оптимальные цвета. Так, для многих сепарирующих машин вполне приемлема однотонная окраска спокойных тонов: фисташкового, салатного, кремового и т. д.

3. Передвижные машины (передвижные зерноочистительные машины и агрегаты) следует окрашивать в цвет, контрастирующий с окружающей средой (оранжевый, желтый).

4. Подчеркивая цветом динамичность той или иной формы, цветовые членения следует располагать горизонтально или в определенном, убывающем или возрастающем ритме.

5. Статичные объекты следует расчленять цветом так, чтобы подчеркнуть их неподвижность. В таких случаях нужно выделить основания, станины машин, окрашивая их в темные тона и создавая этим иллюзию тяжести и монументальности.

6. Необходимо окрашивать машины в такие цвета, на фоне которых хорошо заметен проходящий продукт. Это компенсирует цветное утомление, возникающее от наблюдения за ним. Для этого же рекомендуется окрашивать рабочую зону в цвета с коэффициентом отражения 50—60%.

Одно из средств эстетического воздействия — это отделка машин. Высокие качества отделки, чистота обработки поверхностей формы машины, правильно выбранные материалы внешней отделки воздействуют на рабочего дисциплинирующе, прививают хороший вкус, делают его заботливым и бережливым по отношению к машине. Нельзя относиться к отделке, как к излишеству, повышающему себестоимость изделия. Средства, затраченные на отделку, как правило, окупаются благодаря более длительной службе и хорошей сохраняемости изделия.

Требования к системам управления и автоматизации сепарирующих машин. Дальнейшее развитие предприятий по хранению и переработке зерна, достигших высокой степени механизации, неразрывно связано с комплексной автоматизацией производственных процессов. Автоматизация позволяет интенсифицировать технологический процесс, повысить производительность труда и улучшить его условия, снизить затраты на обработку единицы продукции.

Сейчас в поточных технологических линиях современных элеваторов и зерноперерабатывающих предприятий применяют централизованное управление. Оно обеспечивает пуск и остановки машин и автоматизацию отдельных операций с центрального пульта (ЦПУ). С централизованным управлением был разработан ряд проектов зерноочистительных и перерабатывающих предприятий для сельского хозяйства, в том числе семяочистительно-сушильные заводы, зерноочистительные агрегаты производительностью 10, 20, 30 и 40 т/ч.

В серийно выпускаемых машинах для сепарирования и переработки зерна регулируют и контролируют технологический процесс в основном вручную. При автоматическом управлении требуемые режимы работы оборудования поддерживаются не обслуживающим персоналом, а автоматически действующими устройствами, дополняющими машины и установки, представляя собой их компоненты. Автоматизация зерноочистительных и просеивающих машин вызывает серьезные трудности, и в этой области сделаны пока только первые шаги.

При автоматизации отдельных операций в технологической цепи остаются машины, управляемые вручную, что не позволяет использовать все преимущества автоматизации.

Современная общепризнанная тенденция — это переход к комплексной автоматизации, при которой автоматизируются как главные, так и вспомогательные операции производственного цикла.

При разработке проектов машин с автоматическим принципом необходимо руководствоваться рядом условий. Осмотры машин и технический уход за ними нужно производить циклично через опре-

деленное время. В рабочее время автоматизированная машина должна работать надежно с заданными параметрами. При переходе с одной обрабатываемой культуры на другую машина по мере надобности самоочищается.

При проектировании должны быть предусмотрены все необходимые регулирующие устройства для автоматической перестройки режима работы машины по мере изменения параметров исходного материала. Переход на новый режим осуществляется плавным или ступенчато с достаточно широким диапазоном регулирования. Рабочие органы должны быть быстро заменяемыми при переходе от одной обрабатываемой культуры к другой. В зерноочистительных сепараторах сита заменяют вручную, что представляет собой слабое звено с точки зрения автоматизации процесса.

Машины должны быть стационарными, выполненными в виде отдельных рабочих органов с отдельным приводом. Однако выпускаемые сепарирующие машины имеют два-три рабочих органа. Например, сепаратор ЗСМ-50 имеет пять ярусов сит с отверстиями различной формы и размеров, пневмосепарирующее устройство имеет два канала с неодинаковыми скоростями воздушного потока. Триерный блок состоит из двух — четырех триеров с ячейками различных размеров. Автоматически поддерживать оптимальный режим сепарации в этих сложных конструкциях невозможно.

Таким образом, автоматизировать технологический процесс машин путем добавления к имеющейся технике элементов контроля, регулирования и управления трудно. Автоматизация предполагает перестройку всего технологического процесса, начиная с отдельных машин.

Разрабатывая технологический процесс и схемы для автоматического предприятия, необходимо на одних и тех же устройствах предусматривать однократную обработку материала, причем одновременно отдельные звенья линии нужно использовать на обработке одного и того же материала, а другие — другого. Это позволит повысить коэффициент использования оборудования и сократить число часов работы. При разработке автоматизированных рабочих органов нужно определить и обосновать необходимое минимальное количество сепарирующих машин для осуществления сепарации высокого качества. При этом должна быть обоснована последовательность расстановки рабочих органов в общей схеме процесса.

Применяют различные схемы автоматического управления. Простейшие устройства обеспечивают заданные режимы работы машины в соответствии с настроенной программой без контроля протекания процесса. Такие автоматические системы называют разомкнутыми. Чаще применяют автоматическое управление с непрерывным автоматическим контролем за ходом процесса. Этот контроль обеспечивается подачей на вход системы противодействующего сигнала, величина которого пропорциональна контрольному параметру машины. Поэтому эти системы называют системами с обратной связью, или замкнутыми. Последние подразделяются на

системы автоматического регулирования (САР) и следящие системы.

В системах автоматического регулирования задающий сигнал остается неизменным, а управляющий сигнал, изменяясь при отклонении регулируемой величины, обеспечивает устранение возникающих отклонений и содействует поддержанию регулируемой величины на заданном уровне. Поэтому системы автоматического регулирования в основном предназначены для поддержания в рабочей машине или установке постоянства регулируемой величины с требуемой точностью при наличии различных возмущающих воздействий.

В следящих системах задающий сигнал изменяется произвольно, и эта система благодаря наличию обратной связи по выходной величине все время стремится привести в соответствие выходную величину и задающий сигнал. Выходная величина как бы следует за задающим сигналом, поэтому такие системы и называют следящими. Эти системы предназначены для воспроизведения рабочей машиной или установкой произвольно изменяющихся задающих воздействий [53].

При автоматизации сепарирующих машин для автоматического управления технологическим процессом в первую очередь внимание обращают на четкость разделения исходного продукта на фракции. Четкость работы сепарирующей машины оценивают двумя показателями: извлечением из зерна примесей и содержанием нормального зерна в отходах.

Система автоматического управления и регулирования должна непрерывно вырабатывать информацию о четкости разделения исходной смеси и регулировать режим работы машины. Оценивать работу машины можно путем подачи на контрольный прибор фракции, выделенной основным рабочим органом. Прибор реагирует на содержание примесей во фракции, не выделенных рабочим органом, чем обеспечивается автоматическое регулирование рабочего органа машины.

Работу сит можно оценивать процентным содержанием проходного продукта в сходе (недосевом). Если в сходе содержится проходного продукта свыше допустимых норм, то уменьшают удельную нагрузку на сито. Частоту, амплитуду и наклон сит устанавливают при конструировании машин на основе исследований.

В пневмосепарирующем канале необходимо контролировать обе фракции. Если в легкие примеси попадает много зерна, то скорость воздушного потока уменьшают. Повышенное содержание в зерне легких примесей свидетельствует о том, что канал не справляется с нагрузкой и производительность надо уменьшить.

В настоящее время создают контрольные приборы для автоматизации сепарирующих машин. Как пример можно привести образец прибора с воздушным классификатором, разработанный Всесоюзным научно-исследовательским институтом электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ). Он состоит из пробоотборника, зер-

ноподающего механизма, контрольного прибора, регулирующего органа, механизма удаления обработанной пробы и программного устройства. Контрольный прибор проверяет четкость разделения исходного материала и посылает сигнал на исполнительный механизм регулирующего устройства. Пробоотборник периодически отбирает пробы сепарированного продукта, направляемого в питатель, подающий пробу в аспирационный канал контрольного прибора. Объем отбираемой пробы устанавливают в зависимости от времени открытия заборника, приводимого в действие электромагнитным механизмом.

Контрольный прибор выделяет из фракции остатки компонентов, не выделенных рабочим органом. Под действием воздушного потока проба зерна разделяется по скорости витания на две фракции, поступающие на чашки неравноплечего весового устройства. Точка опоры коромысла весового устройства может перемещаться влево и вправо, и этим устанавливается соотношение массы фракций, при котором наступает равновесие. Если равновесия не наступает, то замыкается один из контактов и в схему автоматического управления подается команда о том, что соотношение между фракциями не соответствует установленному значению. Фракции сдуваются с чашек весов воздушным потоком из воздухопровода, открываемого исполнительным механизмом. Проба попадает в сборник и по патрубку направляется в зернопровод.

Вопросы автоматического регулирования воздушного режима в пневмосепарирующих каналах привлекают внимание многих исследователей. Так, в Одесском технологическом институте пищевой промышленности (ОТИПП) имени М. В. Ломоносова провели ряд экспериментальных работ по автоматическому поддержанию скорости воздуха в пневмосепарирующих каналах в связи с нарушением вследствие различных причин воздушного режима в пневмосепарирующих устройствах. Лабораторные исследования подтвердили практическую возможность решения этого вопроса. В качестве одного из вариантов принципиальной схемы стабилизации воздушного режима по скорости потока воздуха в канале была исследована схема на основе бесконтактного электронного регулятора. Он состоял из датчика, электронных ВЧ генераторов и исполнительного механизма. Датчиком была самоочищающаяся пневмометрическая трубка, установленная для измерения местного скоростного давления в характерной точке сечения канала, где наиболее выравнено поле скоростей воздушного потока. Приемником давления был предусмотрен чашечный микроанометр с переменным углом наклона отсчетной стеклянной трубки.

Работы по автоматизации сепарирующих машин зерноперерабатывающих предприятий еще не получили широкого внедрения, однако требования к системам их управления и автоматизации при создании новых видов оборудования нужно учитывать все более полно.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ *

Вибрация — это наиболее распространенный вид механического воздействия на сыпучий материал при его сепарировании на хлебоприемных и зерноперерабатывающих предприятиях. В семи способах из 12, упомянутых в таблице 1, при помощи вибраций выполняется главная задача сепарирования — перемещение частиц разделяемых фракций в различные области рабочего пространства. Кроме того, вибрации применяют для подачи исходной смеси в рабочее пространство, для транспортирования промежуточных продуктов от одного рабочего органа к другому и для вывода полученных фракций из мест их концентрации в рабочем пространстве.

При вибрациях опорной и боковых поверхностей, ограничивающих сыпучее тело, силовые импульсы от частиц пограничного слоя передаются вглубь, постепенно уменьшаясь вследствие рассеяния энергии. В большинстве интересующих нас случаев физическая характеристика частиц позволяет пренебрегать силами их взаимного притяжения и рассматривать связи как неудерживающие. Такое допущение становится неприемлемым для очень мелких частиц, частиц с поверхностной влагой, несущих электрические заряды, или металломагнитных частиц в магнитном поле.

Усилие, которое можно передать частице от смежных частиц или от твердых поверхностей, ограничивающих сыпучее тело, определяется условиями связи и зависит от направления передачи этого усилия. Если условия связи не позволяют передать частице усилие, необходимое для сообщения ей ускорения, которым располагает ограничивающая поверхность, то происходит относительное движение этой частицы. Для частиц с неодинаковыми физико-механическими свойствами или расположенных в разных точках сыпучего тела условия связи различны, а поэтому различны и ускорения при которых начинается и происходит их относительное движение.

Как следствие движения частиц друг относительно друга сыпучее тело разрыхляется, и объем его увеличивается в направлении свободной поверхности. Так возникают условия для самосортирования, т. е. направленного в среднем перемещения частиц, отличающихся свойствами, в различные участки объема, занятого сыпучим телом.

Если направленное в среднем перемещение всех частиц сыпучего тела одинаково относительно ограничивающих поверхностей, то говорят, что сыпучее тело движется потоком, и основной характеристикой этого движения, называемого подачей, считают среднюю скорость частиц вдоль опорной поверхности. Таким образом, действие вибраций на сыпучее тело проявляется в разрыхлении и

* Вопросы теории виброперемещения изложены в основном по И. И. Блехману.

самосортировании этого тела, с одной стороны, и в подаче, обеспечивающей непрерывность процесса, — с другой.

Иногда эффективность сепарирования определяется преимущественно самосортированием, например в камнеотделительной машине Григоровича. В других случаях самосортирование — это фактор второстепенный, как, например, при ситовом сепарировании смесей с большой концентрацией мелкой фракции. Самосортирование может снижать эффективность сепарирования в целом. Например, при ситовом сепарировании мелкие частицы с меньшей плотностью, чем у крупных, «всплывают» на свободную поверхность, удаляясь от сита, что уменьшает количество прохода.

Подача, характеризуемая средней скоростью частиц в потоке, влияет на эффективность сепарирования обычно через толщину слоя сыпучего материала и время пребывания частиц в рабочем пространстве. При неизменной длине рабочего пространства (например, длина сита) — увеличение средней скорости потока уменьшает время сепарирования и толщину слоя. Уменьшение времени сепарирования всегда снижает его эффективность. Уменьшение же толщины слоя сыпучего материала чаще всего повышает эффективность сепарирования в целом, однако до определенного предела, ниже которого эффективность снижается.

Таким образом, скорость подачи при вибрационном сепарировании сыпучего материала — это основной параметр, от которого зависят производительность и четкость сепарирования. Поэтому расчетное определение средней скорости частиц сыпучего тела в потоке составляет первую задачу теории вибрационного сепарирования.

Исследование этой задачи составлением и решением уравнений движения каждой частицы сыпучего материала с последующим осреднением скорости представило бы непреодолимые трудности, так как сыпучее тело пришлось бы рассматривать как механическую систему с множеством степеней свободы и сложными многообразными связями. В динамике сыпучих сред рассматриваемая задача не только не решена, но и не поставлена. Сейчас теория вибрационного перемещения достаточно полно и строго разработана только для отдельных частиц простейшей формы (плоских и сферических).

Однако, как показывают многочисленные экспериментальные данные, применение формул теории вибрационного перемещения отдельных частиц к расчету вибрационного перемещения сыпучих тел дает вполне удовлетворительную точность в достаточно больших пределах параметров процесса. Расхождения расчетных и опытных данных по средней скорости становятся существенными только при высокой дисперсности частиц сыпучего материала, при толщине потока, неизмеримой с данной вибрирующей опорной поверхностью, и в тех случаях, когда пренебрежение сопротивлением воздушной среды вносит большую погрешность.

Эксперименты показывают также, что теория вибрационного перемещения отдельной частицы применима к анализу движения от-

дельных «особых» частиц при самосортировании, когда совокупность окружающих ее частиц можно считать средой с известным законом движения в каждой точке.

Для сближения результатов применения теории вибрационного перемещения отдельной материальной частицы с действительной картиной движения сыпучих тел много значат методы экспериментального определения коэффициентов, отражающих в расчетных формулах свойства частицы и опорной вибрирующей поверхности. При движении без подбрасывания такими коэффициентами служат коэффициенты трения скольжения и покоя, а при движении с подбрасыванием — также коэффициенты мгновенного ударного трения и восстановления нормальной скорости. Эти коэффициенты, строго говоря, характеризующие условия взаимодействия только двух твердых тел, в случае применения к сыпучему телу носят условный характер, и их численные значения зависят от метода определения.

Наилучшие результаты, естественно, дают методы, условия которых наиболее близки к условиям реального процесса, когда вычисленные значения коэффициентов отражают особенности движения сыпучего тела, характерные для определенной области параметров.

§ 1. Перемещение частицы при прямолинейных наклонных колебаниях

Согласно закону сухого трения, при относительном движении двух соприкасающихся тел сила трения, приложенная к каждому из них, противоположна его относительной скорости и пропорциональна нормальной реакции.

Частица материала, находящаяся на шероховатой поверхности, может выйти из состояния покоя только в том случае, если тангенциальная проекция T равнодействующей R внешних сил (рис. 12) больше предельного значения силы трения $F = fN$, где f — коэффициент трения покоя; N — нормальная реакция. Иначе говоря, движение частицы начинается, когда равнодействующая R внешних сил образует с нормалью n — n угол γ , больший угла трения $\rho = \arctg f$. Если $\gamma < \rho$, то равновесие частицы не нарушается и полная реакция связи равна и противоположна R' . Случай $\gamma = \rho$ соответствует предельному равновесию, а при наличии начальной скорости — равномерному движению.

Рассмотрим материальную частицу на неподвижной наклонной плоскости, образующей с горизонталью угол $\alpha < \rho$ (рис. 13). Пока на частицу, находящуюся в покое, действует внешняя сила $G = mg$, уравновешивающая ее полная реакция связи образует с нормалью угол меньше угла трения. Из этого состояния частицу можно вывести, приложив добавочную силу P , линия действия которой k — k образует с наклонной плоскостью угол β . При этом необходимо, чтобы линия равнодействующей сил G и P выходила за пределы

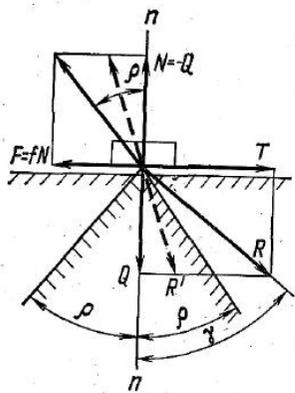


Рис. 12. Схема сил при относительном движении плоской частицы.

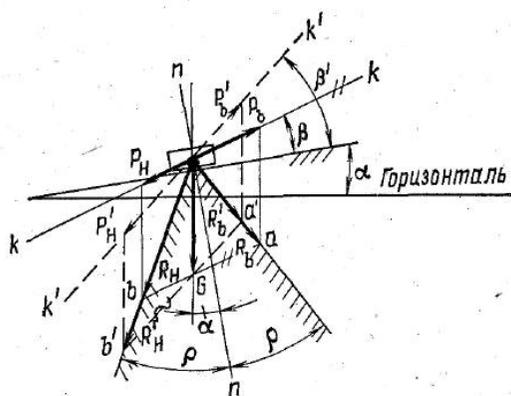


Рис. 13. Условия начала относительного скольжения плоской частицы вверх и вниз по наклонной плоскости.

угла трения ρ . Через конец вектора силы G проведем прямую, параллельную $k-k'$, до границ угла трения в точках a и b , из которых проведем прямые, параллельные силе G , до пересечения с прямой $k-k'$. Полученные точки пересечения определяют концы векторов предельных добавочных сил P_B и P_H . Если добавочная внешняя сила P направлена вверх по прямой $k-k'$ и больше силы P_B , то частица начнет ускоренно двигаться вверх; если же сила P направлена вниз и больше силы P_H , то частица начнет ускоренно двигаться вниз.

В рассмотренном случае $|P_B| > |P_H|$, т. е. для перемещения частицы вверх необходимо приложить большую силу P , чем для движения вниз.

Если сила P — непрерывная периодическая знакопеременная функция времени, например она подчиняется гармоническому закону, то можно выбрать ее амплитудное значение $|P_m|$, удовлетворяющее условию $|P_H| < |P_m| < |P_B|$. В этом случае движение частицы вверх начаться не может, и за каждый период изменения силы P она получит перемещение вниз, чередующееся с состоянием покоя.

Если удовлетворяется условие $|P_m| > |P_B| > |P_H|$, то за один период изменения силы P частица переместится один раз вниз и один раз вверх.

При этом перемещение вниз будет больше, так как $|P_B| > |P_H|$ и условия начала движения частицы вниз ($|P| > |P_H|$) выполняются в течение большего времени, чем условия начала движения вверх ($|P| > |P_B|$). В зависимости от соотношения сил P_m , P_H и P_B интервалы движения частицы вниз и вверх могут быть разделены одним или двумя интервалами покоя. Интервал покоя (пауза) после одного из перемещений наступает тогда, когда частица остановилась раньше, чем возникли условия для ее движения в противоположном направлении. По мере увеличения амплитудного зна-

чения P_m добавочной силы P интервалы покоя уменьшаются и наступает периодический режим без пауз, при котором перемещения в противоположных направлениях разделены мгновенными остановками.

Рассмотренные режимы движения частицы при условии $|P_B| > |P_H|$ характерны преобладанием перемещений вниз, следствием чего будет направленное в среднем движение вниз, так называемая подача с некоторой скоростью v_n , рассчитываемой по уравнению

$$v_n = \frac{s_H + s_B}{T_0} = \frac{n}{60} (s_H + s_B),$$

где s_H и s_B — перемещения частицы соответственно вниз и вверх за один период изменения силы P , м; T_0 — период изменения силы P , с; n — число периодов изменения силы P за 1 мин.

Одним из важнейших параметров, влияющих на режим перемещения частицы, служит угол β , характеризующий ориентацию линии действия добавочной силы P .

Пунктирные построения на рисунке 13 показывают, что с увеличением угла β до β' изменяется соотношение между предельными значениями добавочных сил: теперь возникает неравенство $|P'_B| < |P'_H|$ и преобладающим будет перемещение частицы вверх при возможности воспроизведения периодических режимов, аналогичных рассмотренным ранее.

Заметим, что увеличение угла β до значения $(90^\circ - \rho)$ исключает возможность движения вниз, так как равнодействующая сил P и G при $\beta \geq (90^\circ - \rho)$ проходит внутри угла трения.

Приведенные рассуждения относились к режимам движений частицы без подбрасывания, когда контакт ее с плоскостью обеспечивается все время. Это условие выполняется, если равнодействующая R сил G и P не поднимается выше наклонной плоскости, постоянно прижимая к ней частицу. Предельный случай такого движения соответствует параллелограмму сил (рис. 14) со сторонами G и P_H и их равнодействующей R_H , параллельной наклонной плоскости. Увеличение силы P_H до P' при неизменном угле β или его увеличение до β' при $P'' = P_H$ приводит к повороту равнодействующей (R' и R'') и соответствует режимам движения частицы с подбрасыванием. Продолжительность полета частицы над плоскостью зависит от величины и направления равнодействующей R и от упругих свойств частицы и опорной поверхности. Упругие свойства пары (поверх-

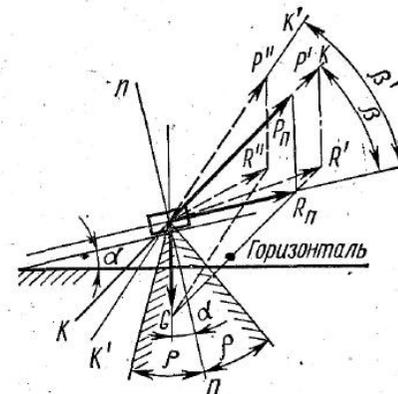


Рис. 14. Условия отрыва частицы от опорной поверхности.

ность — частица) определяют, в частности, поведение частицы после падения на опорную поверхность. При упругом ударе после падения мгновенно следует новый полет частицы, что для периодического установившегося движения создает возможность получения так называемых режимов с непрерывным подбрасыванием. В случае абсолютно неупругого удара, кроме этих режимов, возможны также периодические режимы с интервалами скольжения частицы по опорной поверхности и интервалами ее покоя.

Одна из важных характеристик периодических установившихся режимов — это отношение периода движения T частицы к периоду T_0 изменения добавочной силы P

$$P = \frac{T}{T_0}$$

Если нет подбрасывания, $P = 1$. При подбрасывании частицы в теории вибрационного перемещения рассматривают только те случаи, когда P — целое положительное число. Эти режимы, принятые по терминологии И. И. Блехмана [10], называют правильными.

Рассматриваемые в дальнейшем режимы, по терминологии того же автора, представляют собой регулярные, при которых частица за каждый период перемещается на равные расстояния, что соответствует постоянству подачи.

В предыдущих рассуждениях мы предполагали наклонную плоскость неподвижной и не объясняли природу добавочной силы P , периодические изменения которой вызывали направленное перемещение материальной частицы.

Между тем все установленные положения можно целиком отнести к движению материальной частицы по плоской поверхности, совершающей поступательные колебания, направление которых образует с этой поверхностью угол β (рис. 15). Рассматривая относительное движение частицы массы m в переносной системе координат x, y , жестко связанной с колеблющейся плоскостью, следует к действующим на частицу силам и реакциям связи присоединить переносную силу инерции $P = ma_n$ (a_n — переносное ускорение, т. е. ускорение точек плоскости). Таким образом,

система внешних сил, приложенных к частице, в точности совпадает с рассмотренной ранее, причем роль добавочной силы выполняет переносная сила инерции. Поэтому в относительном движении частиц при колебаниях опорной плоскости возможны все упомянутые выше режимы.

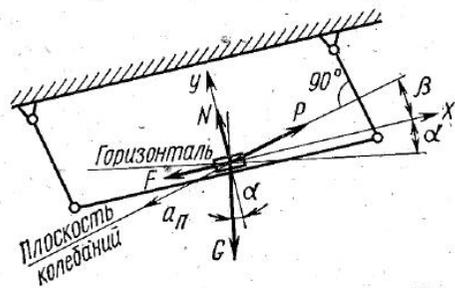


Рис. 15. Схема сил при вибрационном перемещении частицы в случае наклонных колебаний.

Заметим, что, применяя геометрические интерпретации на рисунках 13 и 14 к случаю колебаний опорной плоскости, можно учесть пропорциональность всех показанных сил массе частицы. Поэтому параллелограммы сил можно рассматривать как параллелограммы ускорений, соответствующих этим силам, с учетом изменения масштаба.

В сепарирующих машинах зерноперерабатывающих предприятий применяют преимущественно следующие варианты колебаний опорных поверхностей в вертикальной плоскости и соответствующие им правильные регулярные режимы относительного движения частицы:

прямолинейные гармонические колебания при режиме двустороннего относительного движения частицы без пауз и подбрасывания;

равномерные круговые колебания в режиме непрерывного подбрасывания с равенством периодов относительного движения частицы и опорной поверхности.

Основные параметры вибрационного перемещения в первом случае — это скорость потока, во втором — скорость потока и высота подбрасывания частицы над опорной поверхностью.

Перемещение частицы материала без подбрасывания при прямолинейных гармонических колебаниях опорной плоскости. Составим уравнения относительного движения частицы для случая (см. рис. 15), соответствующего относительной скорости \dot{x} в положительном направлении оси X

$$m\ddot{x} = P^* \cos \beta - G \sin \alpha - F; \quad (16)$$

$$m\ddot{y} = P \sin \beta - G \cos \alpha + N. \quad (17)$$

При гармонических колебаниях наклонной плоскости переносное ускорение

$$a_n = -A\omega^2 \sin \omega t,$$

где A — амплитуда колебаний; ω — частота колебаний.

Поэтому $P = -ma_n = mA\omega^2 \sin \omega t$.

Учитывая, что $G = mg$ и $F = fN$, перепишем уравнения (16) и (17) в следующем виде:

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - fN, \quad (18)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N. \quad (19)$$

Для относительного движения без подбрасывания $y = \text{const}$ и $\ddot{y} = 0$, что позволяет из формулы (19) определить нормальную реакцию N

$$N = mg \cos \alpha - mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t. \quad (20)$$

Если нет подбрасывания, реакция N должна сохранить положительное направление за весь период колебания, даже когда второй член правой части равенства (20) принимает максимальное значение ($\sin \omega t = 1$). Поэтому условие безотрывного движения частицы имеет вид $N > 0$ или

$$1 < z_0 = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta}. \quad (21)$$

Подставляя значение N из формул (20) и (18), после сокращения на m и элементарных преобразований получаем

$$\ddot{x} = A\omega^2(\cos \beta + f \sin \beta) \sin \omega t - g(\sin \alpha + f \cos \alpha),$$

заменяя $f = \operatorname{tg} \rho$, приводим это уравнение к виду

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta - \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)} \right]. \quad (22)$$

Если направление относительной скорости частицы противоположно рассмотренному, то в уравнении (16) знак «+» перед силой F нужно заменить на знак «-». В этом случае после преобразований, аналогичных выполненным, придем к уравнению

$$\ddot{x} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta + \rho)}{\cos \rho} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha - \rho)}{\cos(\beta + \rho)} \right]. \quad (23)$$

Обобщая уравнения (22) и (23), представим их в следующем виде:

$$\ddot{x} = a_{\pm}(\sin \delta - z_{\pm}), \quad (24)$$

где $\delta = \omega t$;

$$a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \rho}; \quad (25)$$

$$z_{\pm} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha \mp \rho)}{\cos(\beta \mp \rho)}. \quad (26)$$

В равенствах (24), (25) и (26) верхние индексы у a и z и верхние знаки перед ρ относятся к случаю положительного направления относительной скорости частицы ($x > 0$), а нижние — к случаю отрицательного направления ($x < 0$). Заметим также, что положительные значения углов α и β соответствуют показанным на рисунке 15. Изменение направления этих углов должно сопровождаться изменением знака перед ними в формулах (25) и (26).

Рассматриваемые случаи ограничим областью значений углов α и β , при которых суммы и разности углов в формулах (25) и (26)

находятся в пределах от $-\frac{\pi}{2}$ до $+\frac{\pi}{2}$. Тогда $a_{\pm} > 0$, $z_{+} > < 0$, а $z_{-} < 0$, так как $|\alpha| < |\rho|$.

Обозначим фазовые углы δ , при которых начинается относительное скольжение частицы в положительном или отрицательном направлении, соответственно δ_{1+} и δ_{1-} , а фазовые углы окончания этих движений соответственно δ_{2+} и δ_{2-} .

Скольжение частицы в положительном направлении может начаться, если $\ddot{x} \geq 0$, т. е. при $\sin \delta_{1+} \geq z_{+}$. Необходимым условием начала скольжения частицы в отрицательном направлении будет $\ddot{x} \leq 0$ при $\sin \delta_{1-} \leq z_{-}$.

Предельно возможные условия начала скольжения в обоих направлениях определяются равенствами

$$\sin \delta_{0+} = z_{+} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha + \rho)}{\cos(\beta - \rho)}, \quad (27)$$

$$\sin \delta_{0-} = z_{-} = \frac{g}{A\omega^2} \frac{\sin(\alpha - \rho)}{\cos(\beta + \rho)}. \quad (28)$$

Если до каждого из углов δ_{0+} и δ_{0-} частица находилась в относительном покое, т. е. предшествовавшее скольжение уже закончилось, то $\delta_{1+} = \delta_{0+}$ и $\delta_{1-} = \delta_{0-}$. Определить выполнение этого условия можно, проинтегрировав уравнение относительного движения (24) и найдя фазовые углы δ_{2+} и δ_{2-} , соответствующие остановке частицы после каждого из перемещений в предположении, что они начались при $\delta_{1+} = \delta_{0+}$ и $\delta_{1-} = \delta_{0-}$, т. е. интервалов покоя. При интегрировании имеем в виду, что

$$t = \frac{\delta}{\omega} \quad \text{и} \quad \dot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \omega \frac{dx}{d\delta}.$$

Вид первых интегралов уравнения (24) для интервалов относительного движения частицы в положительном и отрицательном направлениях соответственно следующий:

$$\dot{x} = \frac{a_{+}}{\omega} [(\cos \delta_{0+} - \cos \delta) - z_{+}(\delta - \delta_{0+})]; \quad (29)$$

$$\dot{x} = \frac{a_{-}}{\omega} [(\cos \delta_{0-} - \cos \delta) - z_{-}(\delta - \delta_{0-})]. \quad (30)$$

Правые части этих уравнений должны обращаться в нуль при прекращении скольжения, т. е. при углах δ_{2+} и δ_{2-} . Поэтому

$$\cos \delta_{0+} - \cos \delta_{2+} = z_{+}(\delta_{2+} - \delta_{0+}) \quad (31)$$

и

$$\cos \delta_{0-} - \cos \delta_{2-} = z_{-}(\delta_{2-} - \delta_{0-}). \quad (32)$$

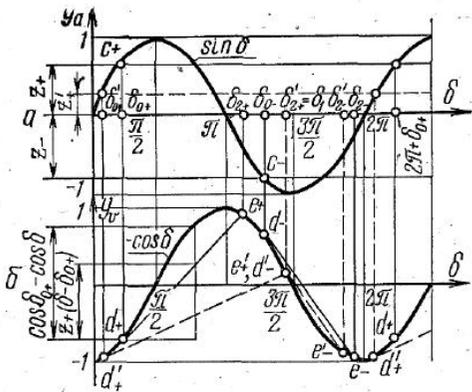


Рис. 16. Геометрическая интерпретация уравнений движения частицы: а — график ускорений; б — график скоростей.

угла наклона к оси абсцисс, равным z_+ . Расстояния по оси ординат от точки d_+ до точек косинусоиды равны $\cos \delta_0 - \cos \delta$, а до точек прямой $-z_+(\delta - \delta_{0+})$. Поэтому отрезки ординат между косинусоидой и прямой равны выражению в прямоугольных скобках правой части уравнения (29), т. е. пропорциональны относительной скорости скольжения частицы в положительном направлении. Точка пересечения e_+ определяет окончание относительного скольжения при искомом фазовом угле δ_{2+} .

Аналогично определяем для скольжения в отрицательном направлении начальный угол δ_{0-} по точке C_- на рисунке 16, а и конечный угол δ_{2-} по точкам d_- и e_- на рисунке 16, б.

Как видно из рисунка 16, скольжение в каждом из направлений прекращается раньше, чем возникают условия для начала движения в противоположном направлении, так как $\delta_{2+} < \delta_{0-}$ и $\delta_{2-} < 2\pi + \delta_{0+}$. Следовательно, для выбранных значений z_+ и z_- справедливо полагать, что относительные скольжения частицы в обоих направлениях начинаются независимо друг от друга при фазовых углах $\delta_{1+} = \delta_{0+}$ и $\delta_{1-} = \delta_{0-}$. В данном случае будет режим двустороннего скольжения частицы с двумя интервалами относительного покоя: при $\delta_{2+} < \delta < \delta_{0-}$ и $\delta_{2-} < \delta < 2\pi + \delta_{0+}$.

Рассмотрим случай при z'_+ и z_- , для которого построения сделаны пунктиром. Здесь касательная к косинусоиде в точке d'_+ с абсциссой $\delta'_{0+} = \arcsin z'_+$ пересекает косинусоиду в точке e_+ при угле $\delta'_{2+} > \delta_{0-}$. Следовательно, скольжение частицы в отрицательном направлении начнется не при угле δ_{0-} (к этому времени еще не закончилось скольжение в положительном направлении), а при угле $\delta_{1-} = \delta'_{2+}$, так как соблюдается условие $\sin \delta_{1-} < z_-$.

Как видно из графика (см. рис. 16, б), прекратится это скольжение при $\delta_{2-} < \delta_{2-}$ (в точке e'_- вместо точки e_-), что не будет пре-

Решение трансцендентных уравнений (31) и (32) относительно δ_{2+} и δ_{2-} графическим методом показано на рисунке 16. На графике рисунка 16, а проведена синусоида $y_a = \sin \delta$ и две прямые $y_a = z_+$ и $y_a = -z_-$. Точки пересечения C_+ и C_- этих прямых с синусоидой соответствуют углам δ_{0+} и δ_{0-} , так как отвечают условиям, выраженным уравнениями (27) и (28).

На графике рисунка 16, б проведена косинусоида $y_v = -\cos \delta$, которой в точке d_+ касается прямая с тангенсом

пятствовать началу очередного скольжения в положительном направлении при $\delta = 2\pi + \delta'_{1+}$ следующего периода колебаний. Таким образом, новый режим характеризуется двусторонним скольжением частицы с одной паузой перед перемещением в положительном направлении.

Если при z'_+ принять меньшее значение z_- , то луч из точки d'_- может пересечь косинусоиду не в точке e'_- , а правее точки d'_+ . Из этого будет следовать, что скольжение в положительном направлении не

может начаться в точке d'_+ следующего, а поэтому и рассматриваемого периода. При дальнейшем графическом решении изменяют угол δ_{1+} и повторяют построения последовательного приближения к установившемуся периодическому движению частицы. В результате таким режимом может оказаться режим двустороннего движения с одной паузой или режим двустороннего движения без пауз (с мгновенными остановками).

Из сказанного ясно, что характер установившегося периодического относительного движения частицы по вибрирующей плоскости определяется значениями безразмерных параметров z_+ и z_- . Области существования возможных режимов, совпадающие с областями устойчивости, относительного движения без подбрасывания и их классификация представлены на рисунке 17.

На этой диаграмме область $|z_{\pm}| \geq 1$ соответствует относительному покою частицы, так как в ней не выполняются одновременно условия начала скольжения в каждом из направлений

$$z_- = -1 < \sin \delta < z_+ = 1.$$

Качественные характеристики за один период регулярных режимов относительного движения следующие:

- режим 1 — двустороннее скольжение частицы с двумя паузами;
- режим 2 — двустороннее скольжение частицы без пауз (с двумя мгновенными остановками);
- режим 3 — двустороннее скольжение частицы с одной паузой с одной мгновенной остановкой;
- режим 4 — скольжение частицы только в одном из направлений с одной паузой.

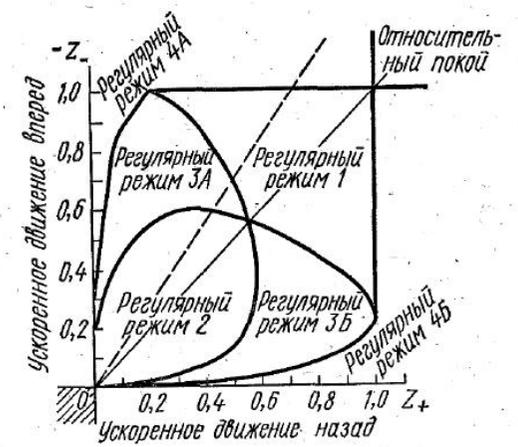


Рис. 17. Области существования режимов безотрывного движения частицы (по И. И. Блехману).

Все области существования режимов симметричны относительно биссектрисы координатного угла (луч $z_+ = -z_-$). Условие $|z_+| < |z_-|$ (область над биссектрисой) благоприятствует преимущественному скольжению в положительном направлении, а условие $|z_+| > |z_-|$ (область под биссектрисой) — в отрицательном направлении. Поэтому в режиме 3А мгновенная остановка происходит после положительного перемещения; а в режиме 3Б — после отрицательного перемещения. Единственное перемещение частицы за период колебаний в режиме 4А происходит в положительном направлении, а в режиме 4Б — в отрицательном.

Рассмотрим возможности получения различных режимов изменением амплитуды A и частоты ω колебаний при неизменных углах α , β и ρ . Параметр, отражающий влияние углов α , β и ρ на вид режима и не зависящий от A и ω , — это отношение

$$K = \frac{z_-}{z_+} = \frac{\sin(\alpha - \rho) \cos(\beta - \rho)}{\cos(\beta + \rho) \sin(\alpha + \rho)}. \quad (33)$$

На диаграмме И. И. Блехмана этот параметр можно представить как тангенс угла наклона к оси z_+ луча из начала координат (на рисунке 17 показан пунктиром)

$$\operatorname{tg} \gamma = \left| \frac{z_-}{z_+} \right| = |K|. \quad (34)$$

Все режимы, которые можно получить, варьируя амплитудное значение ускорения $A\omega^2$ и не изменяя углов α , β и ρ , представлены точками этого луча.

Как видно из уравнений (27) и (28), с увеличением $A\omega^2$ уменьшаются значения z_+ и z_- , а соответствующие точки на луче приближаются к началу координат. Постепенно увеличивая $A\omega^2$, можно из области относительного покоя ($z_+ > 1$) перейти в область регулярного режима 4А ($z_+ < 1$, $z_- > 1$), затем в область регулярного режима 1, регулярного режима 3А и, наконец, получить режим 2, характеризующийся двусторонним движением с двумя мгновенными остановками. Последний регулярный режим преобладает в сепарирующих машинах. Он позволяет наиболее полно использовать время пребывания сепарируемого материала на поверхности рабочего органа (сита или деки), так как извлечение частиц (просеивание) происходит преимущественно при их относительном движении.

Для определения области существования этого режима и скорости транспортирования частицы необходимо определить фазовые углы мгновенных остановок и величины перемещений частицы в каждом из направлений за один период колебаний. Так как в этом режиме начало движения в каждом из направлений совпадает по времени и фазовому углу с окончанием движения в противоположном направлении, получим (рис. 18)

$$\left. \begin{aligned} \delta_{1-} &= \delta_{2+}; \\ \delta_{2-} &= 2\pi + \delta_{1+}. \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Напомним, что в общем случае для рассматриваемого режима выполняются условия $\delta_{1+} \geq \delta_{0+}$ и $\delta_{1-} \geq \delta_{0-}$. Это означает, что движение в одном направлении может закончиться после того, как добавочная сила P достигла значения, достаточного для движения частицы в противоположном направлении.

Условия $\delta_{1+} = \delta_{0+}$ и $\delta_{1-} = \delta_{0-}$ определяют границы области существования данного режима.

Интегрируя дифференциальное уравнение (24) в пределах от $\dot{x} = 0$ до текущего значения $\dot{x} > 0$ и от фазового угла δ_{1+} до текущего значения δ при положительном направлении перемещения, получим аналогично уравнению (29)

$$\dot{x} = \frac{a_+}{\omega} [(\cos \delta_{1+} - \cos \delta) - z_+(\delta - \delta_{1+})]. \quad (36)$$

Для отрицательного направления перемещения частицы уравнение (24) интегрируем от $\dot{x} = 0$ до $\dot{x} < 0$ и от δ_{1-} до δ

$$\dot{x} = \frac{a_-}{\omega} [(\cos \delta_{1-} - \cos \delta) - z_-(\delta - \delta_{1-})]. \quad (37)$$

В мгновение прекращения скольжения $\dot{x} = 0$, а углы δ в уравнениях (36) и (37) принимают соответственно значения $\delta = \delta_{2+}$ и $\delta = \delta_{2-}$. После подстановок конечных условий получаем

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = z_+(\delta_{2+} - \delta_{1+}); \quad (38)$$

$$\cos \delta_{1-} - \cos \delta_{2-} = z_-(\delta_{2-} - \delta_{1-}). \quad (39)$$

Подставим в уравнение (39) значения δ_{1-} и δ_{2-} из (35)

$$\cos \delta_{2+} - \cos(2\pi + \delta_{1+}) = z_-(2\pi + \delta_{1+} - \delta_{2+})$$

или

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = z_-[(\delta_{2+} - \delta_{1+}) - 2\pi]. \quad (40)$$

Приравняем правые части уравнений (38) и (40) и подставим

$$\frac{z_-}{z_+} = K:$$

$$\delta_{2+} - \delta_{1+} = 2\pi \frac{K}{K-1}.$$

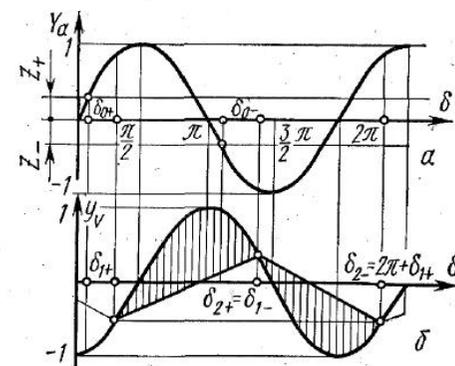


Рис. 18. Геометрическая интерпретация уравнений двустороннего движения частицы с мгновенными остановками:

a — график ускорений; b — график скоростей.

Обозначим

$$\varepsilon = \frac{\delta_{2+} - \delta_{1+}}{2} = \pi \frac{K}{K-1}. \quad (41)$$

Заметим, что при изменении K от 0 до $-\infty$ величина ε изменяется от 0 до π , принимая значение $\frac{\pi}{2}$ при $K=-1$. Представим

$$\cos \delta_{1+} - \cos \delta_{2+} = 2 \sin \frac{\delta_{2+} - \delta_{1+}}{2} \sin \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2}$$

и после подстановки в уравнение (38) получим

$$2 \sin \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} \sin \varepsilon = 2z_+,$$

откуда

$$\frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} = \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon}. \quad (42)$$

Можно заметить по рисунку 18, что $\frac{\pi}{2} < \frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} < \pi$, поэтому, полагая $\arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon}$ острым углом, запишем

$$\frac{\delta_{2+} + \delta_{1+}}{2} = \pi - \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon}. \quad (43)$$

Решим совместно (41) и (43)

$$\delta_{1+} = \left(\pi - \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \right) - \varepsilon; \quad (44)$$

$$\delta_{2+} = \left(\pi - \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \right) + \varepsilon. \quad (45)$$

Для определения области существования режима 2 учтем, что он может перейти в режим 3А ($K < -1$) в случае появления паузы после скольжения в отрицательном направлении или в режим 3В ($-1 < K < 0$) в случае появления паузы после скольжения в положительном направлении. Условия существования режима 2 в этих случаях соответственно:

$$\delta_{1+} \geq \delta_{0+} = \arcsin z_+; \quad (46)$$

$$\delta_{2+} \geq \delta_{0-} = \arcsin z_-. \quad (47)$$

При нарушении условия (46) частица остановится после скольжения в отрицательном направлении и будет находиться в относи-

тельном покое до того мгновения, пока не создадутся условия для ее скольжения в положительном направлении. Аналогично объясняется и условие (47).

Из формулы (44)

$$\sin \delta_{1+} = \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \cos \varepsilon - \cos \left(\pi - \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \right) \sin \varepsilon$$

или

$$\sin \delta_{1+} = \frac{z_+}{\operatorname{tg} \varepsilon} + \sin \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{z_+}{\sin \varepsilon} \right)^2}. \quad (48)$$

Условие (46) перепишем с учетом уравнения (48)

$$\frac{z_+}{\operatorname{tg} \varepsilon} + \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (z_+)^2} \geq z_+. \quad (49)$$

Решим неравенство (49) относительно z_+

$$z_+ \leq \frac{\sin \varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 + \left(1 - \frac{\varepsilon}{\operatorname{tg} \varepsilon}\right)^2}}. \quad (50)$$

Таким образом, граница режимов 2 и 3А определяется следующим соотношением критических параметров:

$$z_+^* = \frac{\sin \varepsilon^*}{\sqrt{(\varepsilon^*)^2 + \left(1 - \frac{\varepsilon^*}{\operatorname{tg} \varepsilon^*}\right)^2}}. \quad (51)$$

Для определения границы режимов 2 и 3В преобразуем формулу (45)

$$\sin \delta_{2+} = \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \cos \varepsilon + \cos \left(\pi - \arcsin \frac{z_+}{\sin \varepsilon} \right) \sin \varepsilon$$

или

$$\sin \delta_{2+} = \frac{z_+}{\operatorname{tg} \varepsilon} - \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (z_+)^2}. \quad (52)$$

Из условия (47) с учетом того, что $\pi < \delta_{2+} < 2\pi$, получим $\sin \delta_{2+} \geq z_-$. При нарушении этого условия оказалось бы, что частица, остановившись после скольжения в положительном направлении при δ_{2+} , не могла бы начать движение в противоположном направлении, пока угол δ не достиг бы величины δ_{0-} . Из сопоставления этого обстоятельства с (52)

$$\frac{z_+}{\operatorname{tg} \varepsilon} - \sqrt{\sin^2 \varepsilon - (z_+)^2} \leq z_-. \quad (53)$$

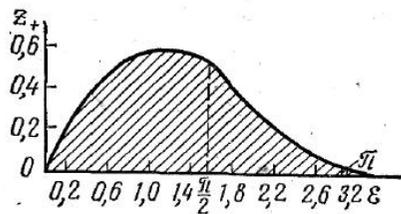


Рис. 19. Область значений ϵ и z_+ , соответствующих режиму двустороннего движения с мгновенными остановками.

Заменим $z_- = Kz_+$ согласно формуле (34) и $K = \frac{\epsilon}{\epsilon - \pi}$ согласно формуле (41)

$$z_- = \frac{\epsilon z_+}{\epsilon - \pi}. \quad (54)$$

Подставим значение z_- в формулу (53) и решим последнее относительно z_+

$$z_+ \leq \frac{\sin \epsilon}{\epsilon \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\pi - \epsilon} + \frac{1}{\text{tg } \epsilon} \right)^2}}. \quad (55)$$

Для критических параметров z_+^* и ϵ^* , определяющих границу режимов 2 и 3Б, получаем

$$z_+^* = \frac{\sin \epsilon^*}{\epsilon^* \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\pi - \epsilon^*} - \frac{1}{\text{tg } \epsilon^*} \right)^2}}. \quad (56)$$

На рисунке 19 заштрихована область значений ϵ и z_+ , удовлетворяющих неравенствам (50) и (55), т. е. соответствующая двустороннему режиму без пауз.

Задаваясь значениями ϵ^* , можно определить по формулам (51) и (56) значения z_+^* , затем по формуле (54) вычислить соответствующую им величину z_-^* и в координатах z_+ , z_- построить кривую $z_-^*(z_+^*)$, ограничивающую на диаграмме И. И. Блехмана область режимов 2 двустороннего относительного движения частицы без пауз.

Для определения перемещений частицы в обоих направлениях за один период колебаний интегрируем уравнение (36) в пределах от δ_{1+} до δ_{2+} и уравнение (37) в пределах от $\delta_{1-} = \delta_{2+}$ до $\delta_{2-} = 2\pi + \delta_{1+}$, имея в виду, что $\dot{x} = \frac{dx}{dt} = \omega \frac{dx}{d\delta}$, и обозначая полное перемещение в каждом из направлений s_+ и s_- , получим следующую формулу:

$$s_+ = \frac{a_+}{\omega^2} \left[(\cos \delta_{1+} + z_+ \delta_{1+})(\delta_{2+} - \delta_{1+}) - (\sin \delta_{2+} - \sin \delta_{1+}) - z_+ \frac{\delta_{2+}^2 + \delta_{1+}^2}{2} \right]. \quad (57)$$

и

$$s_- = \frac{a_-}{\omega^2} \left[(\cos \delta_{2+} + z_- \delta_{2+})(2\pi + \delta_{1+} - \delta_{2+}) - (\sin \delta_{1+} - \sin \delta_{2+}) - z_- \frac{2\pi + \delta_{1+}^2 - \delta_{2+}^2}{2} \right]. \quad (58)$$

Сделав подстановки из формул (40), (41), (44), (45), (48), (52) и (54), получим после преобразований

$$s_+ = \frac{2a_+}{\omega^2} \left(1 - \frac{\epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \sqrt{\sin^2 \epsilon - (\epsilon z_+)^2} \quad (59)$$

и

$$s_- = -\frac{2a_-}{\omega^2} \left(1 + \frac{\pi - \epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \sqrt{\sin^2 \epsilon - (\epsilon z_+)^2}. \quad (60)$$

Средняя скорость частицы (v , м/с) определяется по формуле

$$v = (s_+ + s_-) \frac{n}{60} = (s_+ + s_-) \frac{\omega}{2\pi}, \quad (61)$$

где $n = \frac{30\omega}{\pi}$ — число полных колебаний опорной поверхности в минуту.

После подстановки значений a_{\pm} из (25) получим

$$s_+ = 2A \frac{\cos(\beta - \rho)}{\cos \rho} \left(1 - \frac{\epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \sqrt{\sin^2 \epsilon - (\epsilon z_+)^2}; \quad (62)$$

$$s_- = -2A \frac{\cos(\beta + \rho)}{\cos \rho} \left(1 + \frac{\pi - \epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \sqrt{\sin^2 \epsilon - (\epsilon z_+)^2}. \quad (63)$$

Подставим полученные выражения s_+ и s_- в (61)

$$v = \frac{A\omega}{\pi \cos \rho} \sqrt{\sin^2 \epsilon - (\epsilon z_+)^2} \left[\left(1 - \frac{\epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \cos(\beta - \rho) - \left(1 + \frac{\pi - \epsilon}{\text{tg } \epsilon} \right) \cos(\beta + \rho) \right].$$

После элементарных преобразований запишем окончательно

$$v = A\omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon z}{\sin \varepsilon}\right)^2 \left[\frac{2}{\pi} f \operatorname{tg} \beta \left(\operatorname{tg} \varepsilon - \varepsilon + \frac{\pi}{2}\right) - 1\right]}. \quad (64)$$

Следует помнить о том, что формула (64) позволяет определить скорость транспортирования частицы только при безотрывном двустороннем движении с двумя мгновенными остановками. В других режимах безотрывного движения среднюю скорость частицы не удастся выразить аналитически и для расчетов применяют приближенные методы, подробно рассмотренные в монографии И. И. Блехмана и Г. Ю. Джанелидзе [10]. Основную трудность в решении задачи представляет определение фазовых углов начала и окончания скольжения из трансцендентных уравнений вида (36) и (37). В [10] приведены все необходимые формулы и графики функций, входящие в эти формулы, позволяющие вычислить среднюю скорость частицы в любом регулярном режиме. Во всех случаях можно применять и графический метод, подробно изложенный в монографии Г. Д. Терскова.

При пользовании формулой (64) необходимо предварительно убедиться в том, что рассматриваемый режим действительно безотрывный и двусторонний без пауз. Первое условие проверяют по неравенству (21), а второе — по диаграмме И. И. Блехмана (см. рис. 17) нанесением на нее точки с известными координатами z_+ , z_- или по неравенствам (50) и (51) и соответствующему им графику на рисунке 19.

Анализ формулы (64) позволяет сделать вывод, полезный при исследовании и проектировании сепарирующих машин. Динамические нагрузки на детали машины, а в случае применения несаморавновешенного привода и динамические нагрузки на строительные конструкции прямо пропорциональны амплитудному значению ускорения — $A\omega^2$.

Если положить постоянными $A\omega^2$, а также углы α , β и $\rho = \operatorname{arctg} f$, то согласно формулам (41) и (33) будет постоянным ε , а согласно формуле (26) — и z_+ . В этом случае формулу (64) можно представить в виде

$$v = A\omega C_1, \quad (65)$$

где $C_1 = \operatorname{const}$.

Представляя $A\omega = \frac{A\omega^2}{\omega}$ или $A\omega = \sqrt{A}\sqrt{A\omega^2}$ и обозначая $C_2 = C_1 A\omega^2 = \operatorname{const}$ и $C_3 = C_1 \sqrt{A\omega^2}$, запишем $v = \frac{C_2}{\omega}$ или $v = \sqrt{A} C_3$.

Таким образом, при неизменных $A\omega^2$, α , β и ρ среднюю скорость частицы можно увеличивать, уменьшая частоту колебаний при соответствующем увеличении амплитуды.

В зерноочистительных сепараторах наиболее распространены ситовые устройства с горизонтальными колебаниями наклонных сит.

Применительно к обозначениям рисунка 15 в этом частном случае следует положить $\alpha = -\beta < 0$. Тогда формула (26) принимает вид

$$z_{\pm} = \pm \frac{q}{A\omega^2} \operatorname{tg}(\rho \mp \beta). \quad (66)$$

Пример. Рассмотрим последовательность расчета средней скорости частицы при параметрах, характерных для сепараторов ЗСМ-5, ЗСМ-10 и ЗСМ-20: $n = 500$ об/мин, $\omega = \frac{\pi n}{30} = 52,3$ с⁻¹, $A = 5$ мм = 0,005 м, $\beta = 11^\circ$. Примем коэффициент динамического трения частицы по поверхности пробивного металлического сита $f = 0,4$, что соответствует $\rho = \operatorname{arctg} f = 21^\circ 50'$.

1. По неравенству (21) проверяем безотрывность движения частицы —

$$\frac{q \cos \alpha}{A\omega^2 \sin \beta} = \frac{q}{A\omega^2} \operatorname{ctg} \beta = \frac{9,81}{0,005 \cdot 52,3^2} \operatorname{ctg} 11^\circ = \frac{9,81 \cdot 5,14}{0,005 \cdot 52,3^2} = 3,69 > 1.$$

2. Определяем значения коэффициентов по формуле (66)

$$z_+ = \frac{q}{A\omega^2} \operatorname{tg}(\rho - \beta) = \frac{9,81}{0,005 \cdot 52,3^2} \operatorname{tg}(21^\circ 50' - 11^\circ) = 0,137;$$

$$z_- = -\frac{q}{A\omega^2} \operatorname{tg}(\rho + \beta) = -\frac{9,81}{0,005 \cdot 52,3^2} \operatorname{tg}(21^\circ 50' + 11^\circ) = -0,462.$$

3. По диаграмме И. И. Блехмана (см. рис. 17) проверяем условие двустороннего относительного движения без пауз. Действительно, точка с координатами $z_+ = 0,137$ и $z_- = -0,462$ находится в области регулярного режима 2.

4. По формулам (34) и (46) определяем значения коэффициентов K и ε

$$K = \frac{z_-}{z_+} = -\frac{0,462}{0,137} = -3,37;$$

$$\varepsilon = \pi \frac{K}{K-1} = \pi \frac{-3,37}{-3,37-1} = 2,42 \text{ рад} = 138^\circ$$

5. Определяем для найденного ε его функции

$$\sin \varepsilon = \sin 138^\circ \cong 0,669; \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \operatorname{tg} 138^\circ \cong -0,9;$$

$$\cos \varepsilon = \cos 138^\circ = -0,743.$$

6. По формуле (64) подсчитываем среднюю скорость частицы в относительном движении

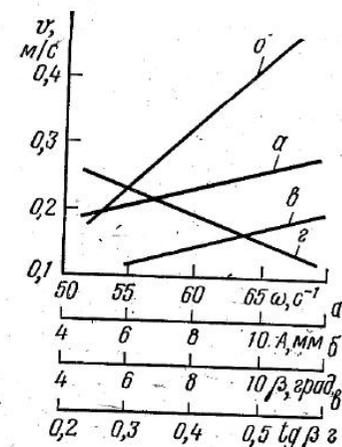


Рис. 20. Кривые зависимости средней скорости v частицы от: a — ω ; b — A ; ε — β ; z — $\operatorname{tg} \beta$.

$$v = A\omega \cos \beta \cos \varepsilon \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon z_0}{\sin \varepsilon}\right)^2} \times \left[\frac{2}{\pi} f \operatorname{tg} \beta \left(\operatorname{tg} \varepsilon - \right. \right. \\ \left. \left. - \varepsilon + \frac{\pi}{2} \right) - 1 \right] = 0,005 \cdot 52,3 \cos 11^\circ \cdot (-0,743) \times \\ \times \sqrt{1 - \left(\frac{2,42 \cdot 0,137}{0,669}\right)^2} \times \left[\frac{2}{3,14} 0,14 \operatorname{tg} 11^\circ (-0,9 - 2,42 + 1,57) - 1 \right] = 0,18 \text{ м/с.}$$

На графиках рисунка 20 показаны зависимости v от ω , A , β и ρ . Причем на каждом графике отражено влияние только одного из параметров, остальные же приняты постоянными и соответствующими рассмотренному примеру.

Сопоставляя эти графики, можно заметить, что наибольшее влияние на значение v оказывает A .

§ 2. Перемещение частицы при круговых колебаниях в вертикальной плоскости

При составлении дифференциальных уравнений относительного движения частицы на наклонной плоскости, совершающей круговые поступательные колебания (рис. 21), учтем силу инерции в переносном движении $P_{in} = mA\omega^2$, силу тяжести частицы mg , нормальную реакцию поверхности N и силу сухого трения F

$$m\ddot{x} = -mA\omega^2 \cos \delta - mg \sin \alpha + F; \quad (67)$$

$$m\ddot{y} = mA\omega^2 \sin \delta - mg \cos \alpha + N. \quad (68)$$

Если частица движется без отрыва от поверхности, то $\dot{y} = 0$ и $y = 0$, а $N > 0$. Поэтому условие безотрывного движения за весь период колебания поверхности ($-1 \leq \sin \delta \leq +1$) будет

$$mg \cos \alpha - mA\omega^2 > 0$$

или

$$1 < z_0 = \frac{g \cos \alpha}{A\omega^2}. \quad (69)$$

Если условие (69) нарушается, то отрыв частицы

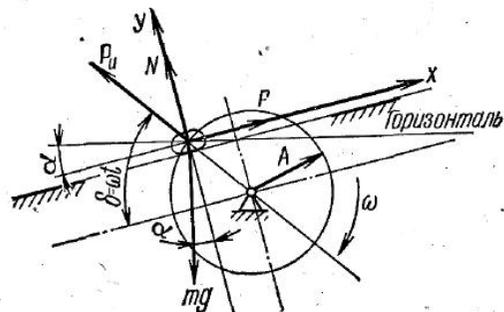


Рис. 21. Схема сил при вибрационном перемещении частицы с подбрасыванием.

произойдет при фазовом угле δ_0 , определяемом из уравнения (68) при $\dot{y} = 0$ и $N = 0$

$$\sin \delta_0 = \frac{g \cos \alpha}{A\omega^2} = z_0. \quad (70)$$

После начала полета, т. е. при $\delta > \delta_0$, уравнения (67) и (68) приобретают вид

$$\ddot{x} = -A\omega^2 \cos \delta - g \sin \alpha \quad (71)$$

и

$$\ddot{y} = A\omega^2 \sin \delta - g \cos \alpha. \quad (72)$$

Как и в случае прямолинейных колебаний поверхности, в рассматриваемой задаче возможны многочисленные режимы регулярного периодического относительного движения частицы. Эти режимы также подразделяют на безотрывные ($z_0 > 1$) и с подбрасыванием ($z_0 < 1$).

Однако безотрывные режимы при круговых колебаниях возможны тогда, когда амплитудные ускорения меньше ускорения частицы при свободном падении, что следует из неравенства (69)

$$(A\omega^2)_k < g \cos \alpha.$$

Для прямолинейных колебаний область амплитудных ускорений при безотрывных режимах существенно увеличивается, как это следует из неравенства (21)

$$(A\omega^2)_n < \frac{g \cos \alpha}{\sin \beta}.$$

Поэтому круговые колебания применяют обычно для воспроизведения режимов с подбрасыванием, т. е. в тех случаях, если для интенсификации процесса сепарирования целесообразно большее разрыхление продукта и изменение ориентации частиц при прохождении через отверстия сита.

Режимы движения частицы с подбрасыванием чрезвычайно многообразны. Отрыв частицы от опорной поверхности может произойти при $\delta \geq \delta_0$, причем до этого мгновения она могла быть в относительном покое, в предшествовавшем полете или могла скользить в одном из двух направлений. Полет частицы может продолжаться часть периода, целый период или несколько периодов колебаний поверхности.

В основу теоретического изучения этих режимов могут быть положены различные гипотезы об ударном взаимодействии частицы с опорной поверхностью: удар может считаться неупругим, частично упругим и абсолютно упругим. Взаимодействие в касательном направлении может быть выражено коэффициентом мгновенного трения, как это сделано большинством исследователей,

или коэффициентом, подобным коэффициенту сухого трения. Последняя гипотеза получила наиболее полное развитие в работах Д. Д. Малкина.

Исследование регулярных режимов с подбрасыванием усложнено несовпадением областей существования некоторых режимов с областями их устойчивости.

Общие методы исследования всех регулярных режимов разработаны И. И. Блехманом [10] и применены им к изучению наиболее распространенных режимов, из которых простейший — это режим с непрерывным подбрасыванием при абсолютной неупругости удара частицы о поверхность. Ниже рассмотрен именно этот режим как наиболее распространенный в сепарирующих машинах с круговыми колебаниями сит в вертикальной плоскости.

Использование гипотезы об абсолютно неупругом ударе оправдано тем, что частицы движутся в большой совокупности и ударное взаимодействие нижнего слоя с опорной поверхностью сопровождается взаимодействием частиц всех слоев с преодолением сил трения. В результате этого происходит интенсивное рассеяние импульса. Таким образом, сыпучее тело, состоящее из упругих частиц, при ударном взаимодействии с опорной поверхностью в первом приближении может быть уподоблено одной неупругой частице, что вполне удовлетворительно согласуется с опытом для зерна и продуктов его измельчения.

По принятой гипотезе в мгновение падения частицы на поверхность под произвольным углом нормальная составляющая относительной скорости \dot{y} обращается в 0, а тангенциальная составляющая, сохраняя свое направление, уменьшается от начального значения \dot{x}_H до конечного \dot{x}_K , причем наблюдается соотношение

$$\frac{\dot{x}_K}{\dot{x}_H} = 1 - \lambda, \quad (73)$$

где λ — коэффициент мгновенного трения при ударе.

Для воспроизведения режима с непрерывным подбрасыванием необходимо, чтобы частица падала на поверхность при фазовом угле $\delta_H \geq \delta_0$, так как в противном случае она после падения должна была бы остаться на поверхности (скользить или находиться в покое) до наступления фазового угла δ_0 .

Проинтегрируем уравнения (71) и (72) в предположении, что в начальное мгновение полета $\delta = \omega t = \delta_1$, $\dot{y} = 0$ и $\dot{x} = \dot{x}_1$

$$\dot{x} - \dot{x}_1 = -A\omega(\sin \delta - \sin \delta_1) - \frac{g}{\omega} \sin \alpha (\delta - \delta_1); \quad (74)$$

$$\dot{y} = -A\omega(\cos \delta - \cos \delta_1) - \frac{g}{\omega} \cos \alpha (\delta - \delta_1). \quad (75)$$

Для мгновения падения частицы на опорную поверхность положим

$$\dot{x} = \dot{x}_2, \dot{y} = \dot{y}_2 \text{ и } \delta_2 = \delta_1 - 2\pi p,$$

где $p = \frac{T}{T_0}$ — коэффициент кратности периода полета, показывающий, во сколько раз время T пребывания частицы в полете больше периода колебаний T_0 . Первоначально положим, что p — произвольное целое число ($p = 1, 2, 3, \dots$).

Подставим конечные значения переменных \dot{x} , \dot{y} и δ в уравнения (74) и (75)

$$\dot{x}_2 - \dot{x}_1 = -\frac{2g\pi p}{\omega} \sin \alpha; \quad (76)$$

$$\dot{y}_2 = -\frac{2g\pi p}{\omega} \cos \alpha. \quad (77)$$

Учитывая регулярность режима, заметим, что скорость \dot{x}_2 при падении в данном периоде T_0 равна скорости в начале удара в предшествующем периоде, т. е. связана со скоростью \dot{x}_1 соотношением (73). Поэтому

$$\frac{\dot{x}_1}{\dot{x}_2} = 1 - \lambda. \quad (78)$$

Решим совместно уравнения (76) и (78)

$$\dot{x}_1 = -\frac{1-\lambda}{\lambda} \cdot \frac{2\pi p g}{\omega} \sin \alpha \quad (79)$$

и

$$\dot{x}_2 = -\frac{2\pi p g}{\lambda \omega} \sin \alpha. \quad (80)$$

Для определения полного перемещения частицы за один период T_0 интегрируем уравнение (74) в пределах изменения от 0 до s и δ от δ_1 до δ_2

$$s = A(\cos \delta_2 - \cos \delta_1) + A(\delta_2 - \delta_1) \sin \delta_1 - \frac{g}{\omega^2} \sin \alpha \times \\ \times \frac{(\delta_2^2 - \delta_1^2)}{2} + \frac{g}{\omega^2} \delta_1(\delta_2 - \delta_1) \sin \alpha + \frac{\dot{x}_1}{\omega} (\delta_2 - \delta_1). \quad (81)$$

Подставляя в формулу (81) $\delta_2 = \delta_1 + 2\pi p$ и \dot{x} из формулы (79), получим после преобразований

$$s = 2\pi p A \left[\sin \delta_1 - \frac{\pi p g}{A\omega^2} \frac{(2-\lambda)}{\lambda} \sin \alpha \right]. \quad (82)$$

Для определения фазового угла δ_1 интегрируем уравнение (75) от δ_1 до δ_2 , учитывая, что $y_1 = y_2 = 0$:

$$0 = -A(\sin \delta_2 - \sin \delta_1) + A(\delta_2 - \delta_1) \cos \delta_1 - \frac{g}{\omega^2} \times \\ \times \frac{(\delta_2^2 - \delta_1^2)}{2} \cos \alpha + \frac{g}{\omega^2} \delta_1 (\delta_2 - \delta_1) \cos \alpha$$

или

$$\frac{g \cos \alpha}{A \omega^2} \cdot \frac{(\delta_2 - \delta_1)^2}{2} - (\sin \delta_2 - \sin \delta_1) + (\delta_2 - \delta_1) \cos \delta_1 = 0. \quad (83)$$

Подставляя $\delta_2 = \delta_1 + 2\pi p$, после преобразований находим

$$\cos \delta_1 = \frac{\pi p g \cos \alpha}{A \omega^2} = \pi p z_0. \quad (84)$$

Заменяв $\sin \delta_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \delta_1}$, приведем формулу (82) к виду

$$s = 2\pi p A \left(\sqrt{1 - (\pi p z_0)^2} - \frac{2 - \lambda}{\lambda} \pi p z_0 \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (85)$$

Среднюю скорость частицы получим, разделив ее полное перемещение s в полете на продолжительность полета $T = pT_0$,

$$\text{где } T_0 = \frac{2\pi}{\omega}.$$

В результате запишем

$$v = A\omega \left(\sqrt{1 - (\pi p z_0)^2} - \frac{2 - \lambda}{\lambda} \pi p z_0 \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (86)$$

При выводе формулы (86) направление угловой скорости ω было принято по часовой стрелке, как показано на рисунке 21. Если принять противоположное направление ω , соответственно изменив направление отсчета углов δ от положительного направления оси X , то в уравнении (71) перед первым слагаемым правой части следует заменить знак «+» на знак «-». Тогда после выполнения всех действий придем к формуле

$$v = A\omega \left(-\sqrt{1 - (\pi p z_0)^2} - \frac{2 - \lambda}{\lambda} \pi p z_0 \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (87)$$

Сопоставляя формулы (86) и (87), замечаем, что знак первого слагаемого v зависит от направления угловой скорости, а знак второго слагаемого — от направления, в котором отложен от горизонтали угол α .

Для определения величины и направления средней скорости частицы достаточно формулы (86) с применением такого правила: положительному знаку средней скорости частицы соответствует направление скорости точки опорной поверхности в верхней половине ее траектории; если это направление совпадает с уклоном вниз по поверхности, то угол α следует брать со знаком «-», в противном случае — со знаком «+».

При перемещении частицы по горизонтальной плоскости $\alpha = 0$ и формула (86) приобретает вид

$$v = A\omega \sqrt{1 - (\pi p z_0)^2}. \quad (88)$$

Для определения средней скорости частицы необходимо знать коэффициент кратности периода полета p , который считали равным целому числу. Полет частицы может начаться в любое мгновение, когда нарушено условие (69) безотрывного движения, т. е. при фазовом угле

$$\delta_0 \leq \delta_1 \leq \pi - \delta_0,$$

что соответствует условию

$$\sin \delta_1 \geq \sin \delta_0. \quad (89)$$

Из формулы (84) находим

$$\sin \delta_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \delta_1} = \sqrt{1 - \pi^2 p^2 z_0^2},$$

а из формулы (70) следует

$$\sin \delta_0 = z_0.$$

Поэтому условие существования исследуемого режима согласно неравенству (89) принимает вид

$$\sqrt{1 - \pi^2 p^2 z_0^2} \geq z_0. \quad (90)$$

Решим это неравенство

$$z_0 \leq \frac{1}{\sqrt{1 + \pi^2 p^2}} = z'_0 \quad (91)$$

или

$$p \leq \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{z_0^2} - 1}. \quad (92)$$

Неравенство (91) определяет нижний предел параметра z_0 в области существования режимов с непрерывным подбрасыванием частицы при заданном значении коэффициента кратности периода полета $p = 1, 2, 3 \dots$

Как было показано И. И. Блехманом, верхний предел параметра z_0 , при котором возможен исследуемый режим с заданным значением p , определяется по условиям устойчивости.

Применим метод исследования устойчивости периодических режимов вибрационного перемещения по моментам перехода, обоснованный И. И. Блехманом [10].

Внесем в установившееся регулярное движение частицы возмущение малыми смещениями фазовых углов отрыва и падения соответственно на Δ_1 и Δ_2 . Тогда в трансцендентное уравнение (83), связывающее фазовые углы отрыва и падения, вместо δ_1 и δ_2 следует подставить соответственно $\delta_1 + \Delta_1$ и $\delta_2 + \Delta_2$.

Учитывая, что $\frac{g \cos \alpha}{A \omega^2} = z_0$, получим

$$-\frac{z_0}{2}[(\delta_2 + \Delta_2) - (\delta_1 + \Delta_1)]^2 - [\sin(\delta_2 + \Delta_2) - \sin(\delta_1 + \Delta_1)] + [(\delta_2 + \Delta_2) - (\delta_1 + \Delta_1)] \cos(\delta_1 + \Delta_1) = 0. \quad (93)$$

Так как в регулярном режиме с непрерывным подбрасыванием $\delta_2 = 2\pi p + \delta_1$, то уравнение (93) можно представить в следующем виде:

$$-\frac{z_0}{2}[2\pi p + (\Delta_2 - \Delta_1)]^2 - [\sin(\delta_1 + \Delta_2) - \sin(\delta_1 + \Delta_1)] + [2\pi p + (\Delta_2 - \Delta_1)] \cos(\delta_1 + \Delta_1) = 0. \quad (94)$$

Пренебрегая степенями отклонений Δ_1 и Δ_2 , более высокими, чем первая, запишем

$$\cos(\delta_1 + \Delta_1) \approx \cos \delta_1 - \Delta_1 \sin \delta_1;$$

$$\sin(\delta_1 + \Delta_2) \approx \sin \delta_1 + \Delta_2 \cos \delta_1;$$

$$\sin(\delta_1 + \Delta_1) \approx \sin \delta_1 + \Delta_1 \cos \delta_1.$$

Подставляя приближенные выражения тригонометрических функций в уравнение (94) и вновь пренебрегая второй степенью отклонений Δ_1 и Δ_2 , получим после элементарных преобразований

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = 1 - \sqrt{\frac{1}{z_0^2} - \pi^2 p^2}. \quad (95)$$

Если в результате внесенного возмущения отклонение фазового угла отрыва будет увеличиваться в каждом последующем периоде полета частицы, то регулярный режим, в который было внесено возмущение, неустойчив в малом.

Если же каждое последующее отклонение фазового угла будет меньше предыдущего, то с течением времени частица вернется к первоначальному режиму, что свидетельствует о его устойчивости. Так как в режиме с непрерывным подбрасыванием отклонение Δ_2

угла падения в данном периоде представляет собой в то же время отклонение угла отрыва в следующем периоде, то условие устойчивости с учетом возможного различия в знаках отклонений Δ_1 и Δ_2 можно представить в виде

$$\left| \frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right| < 1. \quad (96)$$

Тогда из сопоставления уравнения (95) и неравенства (96)

$$\left| 1 - \sqrt{\frac{1}{z_0^2} - \pi^2 p^2} \right| < 1. \quad (97)$$

Решение этого неравенства $\sqrt{\frac{1}{z_0^2} - \pi^2 p^2} < 2$ приводит к формуле

$$z_0 > \frac{1}{\sqrt{\pi^2 p^2 + 4}} = z_0'' \quad (98)$$

или

$$p > \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{z_0^2} - 4}. \quad (99)$$

Неравенство (98) определяет верхний предел параметра z_0 в области возможных регулярных режимов движения частицы с непрерывным подбрасыванием по условиям устойчивости при заданном значении коэффициента p . Таким образом, каждому значению $p = 1, 2, 3, \dots$ соответствует область возможных значений z_0 , определяемая неравенством

$$z_0' < z_0 \leq z_0''. \quad (100)$$

В таблице 10 приведены значения z_0' и z_0'' , вычисленные по формулам (91) и (98) для практически целесообразных значений $p = 1, 2, 3^*$.

Таблица 10. Критические значения параметров z_0' и z_0''

Параметры	Коэффициент кратности периода полета		
	1	2	3
z_0'	0,3034	0,1572	0,1055
z_0''	0,2185	0,1516	0,1038

Как видно из данных таблицы 10, области возможных режимов с непрерывным подбрасыванием частицы уменьшаются с увеличением p .

* Таблица с большим диапазоном значений p , включающая также параметры, ограничивающие области существования и устойчивости регулярных режимов с одним подбрасыванием и скольжением частицы, приведена в [10].

Значения параметра z_0 между нижней границей области для данного коэффициента p и верхней границей области для следующего за ним значения p соответствуют более сложным по структуре регулярным режимам движения частицы (движение с полетом и скольжением в одном периоде T и т. п.). Определение средней относительной скорости частицы в этих областях параметра z_0 (исследованных еще не полностью) может быть выполнено по приведенным в [10] формулам и графикам или с любой степенью приближения по изложенным там же общим методам. Однако с достаточной для инженерных расчетов точностью можно, как это обосновано И. И. Блехманом, применять и формулу (86), введя в расчет вместо коэффициента кратности $p=1, 2, 3...$ некоторый условный параметр p' , представляющий собой непрерывную функцию параметра и подсчитываемый как среднее между значениями z'_0 и z''_0 :

$$p' = \frac{1}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{1}{z_0'^2} - 1} + \sqrt{\frac{1}{z_0''^2} - 4} \right). \quad (101)$$

В этом случае формула (86) принимает вид

$$v = A\omega \left(\sqrt{1 - (\pi p' z_0)^2} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \pi p' z_0 \operatorname{tg} \alpha \right). \quad (102)$$

Естественно, что формула (102) дает точные решения только в тех случаях, если p' принимает целые значения ($p=1, 2, 3$ и т. д.). Практически точность получается вполне достаточной в области интенсивных вибраций, когда обеспечивается условие

$$z_0 \leq 0,3. \quad (103)$$

Пример. Определить среднюю скорость частицы при параметрах, характерных для вибрационного сепаратора, изготовляемого машиностроительным заводом в ФРГ [55]: $\omega = 150 \text{ с}^{-1}$, $A = 2,1 \text{ мм} = 0,0021 \text{ м}$, $\alpha = 15^\circ$, $\lambda = 0,8$.

1. Определяем параметр $z_0 = \frac{g \cos \alpha}{A\omega^2} = \frac{9,81 \cdot 0,966}{0,0021 \cdot 150^2} = 0,2$, что удовлетворяет условию (103).

2. Определяем параметр:

$$p' = \frac{1}{2\pi} \left(\sqrt{\frac{1}{z_0'^2} - 1} + \sqrt{\frac{1}{z_0''^2} - 4} \right) = \frac{1}{2\pi} (\sqrt{25 - 1} + \sqrt{25 - 4}) = 1,51.$$

3. Вычислим среднюю скорость частицы в предположении, что скорость точки сита в верхней части траектории направлена вниз по уклону (сито повернуто от горизонтали на угол α в направлении ω), поэтому, оба слагаемые средней скорости следует считать положительными

$$v = A\omega \left(\sqrt{1 - (\pi p' z_0)^2} + \frac{2-\lambda}{\lambda} \pi p' z_0 \operatorname{tg} \alpha \right) = 0,0021 \times \\ \times 150 \left(\sqrt{1 - (3,14 \cdot 1,51 \cdot 0,2)^2} + \frac{2-0,8}{0,8} \cdot 3,14 \cdot 1,51 \cdot 0,2 \cdot 0,268 \right) = \\ = 0,218 \text{ м/с}.$$

Если изменить направление угла наклона сита при том же направлении угловой скорости, то второе слагаемое в скобках следует представить со знаком « \rightarrow » ($\alpha = -15^\circ$):

$$v = A\omega \left[\sqrt{1 - (\pi p' z_0)^2} - \frac{2-\lambda}{\lambda} \pi p' z_0 \operatorname{tg} \alpha \right] = \\ = 0,0021 \cdot 150 \left[\sqrt{1 - (3,14 \cdot 1,51 \cdot 0,2)^2} - \frac{2-0,8}{0,8} \cdot 3,14 \cdot 1,51 \cdot 0,2 \cdot 0,268 \right] = \\ = -0,0218 \text{ м/с}.$$

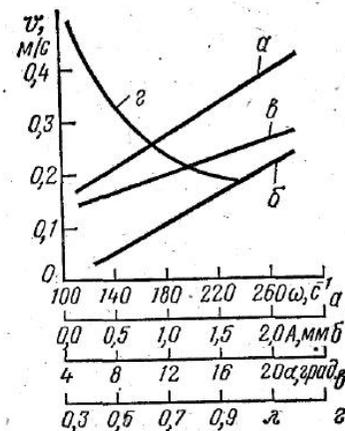


Рис. 22. Кривые зависимости средней скорости частицы от: $\alpha - \omega$; $\beta - A$; $\gamma - \alpha$; $\delta - \lambda$.

На графиках рисунка 22 показаны зависимости v от: A , ω , $\alpha > 0$ и λ , причем на каждом графике отражено влияние только одного параметра, а все остальные постоянны и соответствуют рассмотренному примеру.

В имеющихся машинах угол α по абсолютной величине редко больше 15° , что позволяет в первом приближении считать $\cos \alpha = 1$ и полагать z_0 и p' не зависящими от этого угла. Тогда зависящей от угла α будет лишь вторая составляющая средней скорости. Примем значения этой составляющей пропорциональными углу α , что удобно при настройке машины на оптимальный режим.

Формулу (102) удобно также применить для определения коэффициента мгновенного трения при известных значениях A , ω и α и найденном из опыта значении средней скорости v .

Выше было замечено, что режимы с непрерывным подбрасыванием частиц целесообразны в некоторых случаях ситового сепарирования. Например, вероятность просеивания частицы удлиненной формы ($l/b > 2$) при движении без подбрасывания по сити с круглыми отверстиями ничтожна, даже если ее ширина b меньше диаметра отверстия d (рис. 23, а). Для просеивания частица должна занять такое положение, при котором над отверстием по вертикали находятся одновременно ее конец и центр масс (рис. 23, б) при подъеме центра масс на расстояние H_0 от поверхности горизонтального сита. Если просеивание такой частицы желательно по технологическим соображениям, то, несмотря на условность предложенной схемы, очевидно, что подбрасывание ее центра масс на высоту $H_0 \geq \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 - d^2}$ целесообразно, так как увеличивает вероятность просеивания.

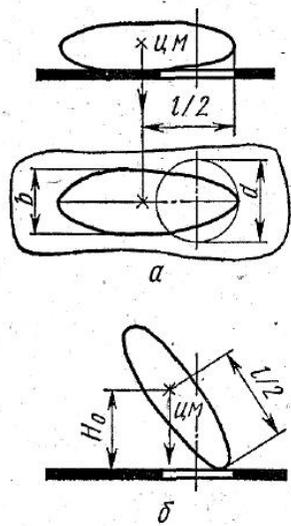


Рис. 23. Схема движения частицы удлиненной формы над круглым отверстием: а — без подбрасывания; б — с подбрасыванием.

Аналогично этому можно объяснить целесообразность подбрасывания частиц плоской формы при разделении по толщине посредством сит с продолговатыми отверстиями.

Поэтому для рассматриваемых режимов относительного движения частиц с непрерывным подбрасыванием полезно знать максимальное удаление центра масс частицы от плоскости сита в период полета. Для этого вернемся к уравнению (75), выражающему зависимость нормальной составляющей скорости частицы к поверхности сита от угла δ . При максимальном удалении частицы от плоскости сита $y=h, \dot{y}=0, \delta=\delta_h$.

Величину h найдем, интегрируя уравнение (75) в пределах от δ_1 до δ_h и от 0 до h :

$$h = A(\sin \delta_1 - \sin \delta_h) + A(\delta_h - \delta_1) \cos \delta_1 - \frac{g}{\omega^2} \times \\ \times \frac{(\delta_h^2 - \delta_1^2)}{2} \cos \alpha + \frac{g}{\omega^2} \delta_1(\delta_h - \delta_1) \cos \alpha.$$

После преобразований

$$\frac{h}{A} = (\sin \delta_1 - \sin \delta_h) + (\delta_h - \delta_1) \cos \delta_1 - \frac{z_0}{2} (\delta_h - \delta_1)^2. \quad (104)$$

Для определения угла δ_h подставим в формулу (75) $\dot{y}=0$ и $\delta=\delta_h$.

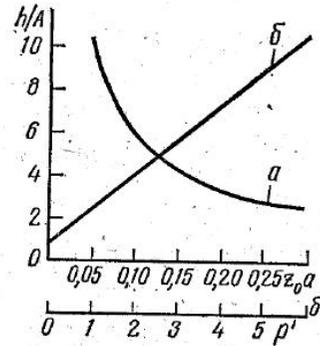


Рис. 24. Кривые зависимости относительной высоты подбрасывания частицы от: а — параметра z_0 ; б — параметра $p'(z_0)$.

Учитывая, что $\frac{g \cos \alpha}{A \omega^2} = z_0$, получим

$$\cos \delta_h + z_0 \delta_h = \cos \delta_1 + z_0 \delta_1. \quad (105)$$

В уравнении (105) $\cos \delta_1$ можно определить из уравнения (84), подставив в него вместо $p=1, 2, 3 \dots$ введенную ранее функцию p' по формуле (101) от аргумента z_0 . Тогда

$$\cos \delta_1 = \pi p' z_0. \quad (106)$$

На рисунке 24,а представлена зависимость $\frac{h}{A}(z_0)$, полученная при помощи ЭЦВМ в такой последовательности: для выбранных z_0 определяли по формуле (101) значения функции $p'(z_0)$ и по формуле (106) — соответствующий ей угол $0 < \delta_1 < \frac{\pi}{2}$; решали трансцендентное уравнение (105) относительно δ_h и, наконец, по значениям δ_1, δ_h и z_0 вычисляли из выражения (104) искомую величину $\frac{h}{A}$.

Одному значению z_0 отвечает несколько корней уравнения (105) и соответственно несколько значений $\frac{h}{A}$, из которых для построения графика (см. рис. 24,а) выбраны наибольшие, представляющие собой «максимум максиморум» относительного положения частицы от начала координат по оси Y. Заметим, что величину h следует рассматривать как наибольшее перемещение центра масс частицы в направлении нормали к опорной поверхности, измеренное от начального положения рассматриваемой точки в мгновение удара.

Более удобен для пользования график на рисунке 17, б, где $\frac{h}{A}$ представлено в функции $p'(z_0)$, причем полученная зависимость очень близка к линейной и в интересующей нас области вполне удовлетворительно аппроксимируется формулой

$$\frac{h}{A} = 1 + 1,6 p'(z_0). \quad (107)$$

Следует помнить о том, что значения $\frac{h}{A}$ по формуле (104), строго говоря, справедливы в областях z_0 , удовлетворяющих неравенству (100), т. е. при $p'=p=1, 2, 3 \dots$

Пользуясь полученными результатами, определим наибольшее перемещение центра масс частицы применительно к предыдущему примеру (см. стр. 72). Так как $z_0 = 0,2$ и $p' = 1,51$, то по графикам (см. рис. 24) имеем $\frac{h}{A} = 3,5$ или $h \approx 3,5A = 3,5 \cdot 2,1 \approx \approx 7,5$ мм.

§ 3. Перемещение частицы при круговых колебаниях в горизонтальной плоскости

Движение плоской частицы*. Рассмотрим плоскую материальную частицу массой m на шероховатой горизонтальной поверхности, совершающей горизонтальные круговые колебания с частотой ω и амплитудой-радиусом R (рис. 25). Относительному движению частицы по поверхности препятствует сила трения, предельное значение которой $F = mgf$,

где f — коэффициент сухого трения покоя, принятый равным коэффициенту трения движения.

Частица движется вместе с поверхностью (без относительного движения), пока сила инерции $m\omega^2 R$ не превосходит предельной силы трения F . Поэтому условие относительного покоя будет

$$m\omega^2 R \leq mgf. \quad (108)$$

Максимальное значение центростремительного ускорения, сообщаемого частице силой трения, составляет

$$(R\omega^2)_0 = gf. \quad (109)$$

Рассмотрим относительное движение частицы при $R\omega^2 > (R\omega^2)_0$ в координатной системе X, Y , принадлежащей опорной поверхности. Учтем действие на частицу переносной силы инерции $P = m\omega^2 R$ и силы трения $F = mgf$, направленной противоположно вектору скорости $v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ в относительном движении и поэтому образующей с осью X угол α , причем

$$\cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$$

и

$$\sin \alpha = \frac{y}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$$

Дифференциальные уравнения относительного движения частицы:

$$m\ddot{x} = m\omega^2 R \cos \omega t - gfm \cos \alpha$$

и

$$m\ddot{y} = m\omega^2 R \sin \omega t - gfm \sin \alpha$$

или

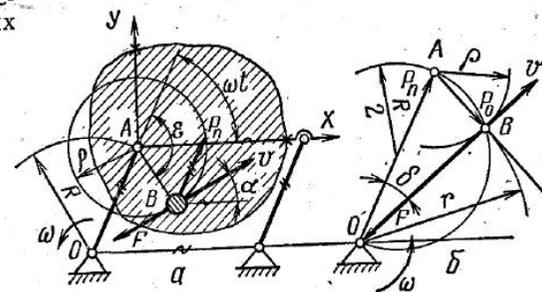
$$\ddot{x} = \omega^2 R \cos \omega t - gf \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (110)$$

и

$$\ddot{y} = \omega^2 R \sin \omega t - gf \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (111)$$

* Эта задача впервые была решена Н. Е. Жуковским в геометрической интерпретации [37], аналитически изучена Цзя-Шу-Хуаем, обобщена и распространена на случаи эллиптических колебаний опорной поверхности И. И. Блехманом [10].

Рис. 25. Схема движения частицы при круговых колебаниях в горизонтальной плоскости: а — общая; б — треугольник сил.



Частные решения уравнений (110) и (111), соответствующие предельному движению частицы, к которому она стремится с течением времени, следующие:

$$x = \rho \cos(\omega t + \epsilon); \quad (112)$$

$$y = \rho \sin(\omega t + \epsilon). \quad (113)$$

Дифференцируем формулы (112) и (113) по времени

$$\dot{x} = -\rho\omega \sin(\omega t + \epsilon); \quad (114)$$

$$\ddot{x} = -\rho\omega^2 \cos(\omega t + \epsilon); \quad (115)$$

$$\dot{y} = \rho\omega \cos(\omega t + \epsilon); \quad (116)$$

$$\ddot{y} = -\rho\omega^2 \sin(\omega t + \epsilon). \quad (117)$$

После подстановки \dot{x} и \ddot{x} в уравнение (110) и элементарных преобразований

$$-\rho\omega^2 \cos(\omega t + \epsilon) = R\omega^2 \cos \omega t + gf \sin(\omega t + \epsilon).$$

Положим

$$\frac{\rho\omega^2}{gf} = \operatorname{tg} \delta, \quad (118)$$

тогда

$$-\frac{R\omega^2}{gf} \cos \omega t = \operatorname{tg} \delta \cos(\omega t + \epsilon) + \sin(\omega t + \epsilon)$$

или

$$-\frac{R\omega^2}{gf} \cos \omega t = \frac{1}{\cos \delta} \sin(\omega t + \epsilon + \delta). \quad (119)$$

Уравнение (119) обращается в тождество, если

$$\cos \delta = \frac{gf}{R\omega^2} \quad (120)$$

и

$$\epsilon = -\left(\frac{\pi}{2} + \delta\right). \quad (121)$$

Определим из уравнения (118)

$$\rho = \frac{gf}{\omega^2 \cos \delta} \sqrt{1 - \cos^2 \delta}$$

и, учитывая уравнение (120), получим

$$\rho = R \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{R\omega^2}\right)^2} \quad (122)$$

Таким образом, при постоянных ω , R и f относительное движение частицы происходит по окружности радиуса ρ с отставанием по фазе от переносного движения на угол $\frac{\pi}{2} + \delta$. Те же результаты можно получить, сопоставляя уравнение (111) с уравнением (113).

Абсолютное движение также происходит по окружности, причем единственной силой, действующей на частицу в горизонтальной плоскости, будет сила трения $F = mgf$, создающая постоянное центростремительное ускорение $\omega^2 r$, где r — радиус траектории частицы в абсолютном движении.

Имеем $mgf = m\omega^2 r$, откуда

$$r = \frac{gf}{\omega^2} \quad (123)$$

Представляет интерес простая геометрическая интерпретация полученного результата. Векторное уравнение динамического равновесия частицы по принципу Даламбера запишем в следующем виде:

$$\bar{P}_a + \bar{F} = 0, \quad (124)$$

где $\bar{P}_a = m\omega^2 r$ — сила инерции частицы в абсолютном движении, которую можно разложить по уравнению:

$$\bar{P}_a = \bar{P}_n + \bar{P}_o \quad (125)$$

и переписать уравнение (124):

$$\bar{P}_n + \bar{P}_o + \bar{F} = 0, \quad (126)$$

где $\bar{P}_n = m\omega^2 \bar{R}$ — сила инерции в переносном движении; $\bar{P}_o = m\omega^2 \bar{\rho}$ — сила инерции в относительном движении.

В векторном треугольнике сил (рис. 25, б) вектор силы трения \bar{F} направлен против относительной скорости \bar{v} , касательной к окружности радиуса ρ и поэтому перпендикулярной ему, а следовательно, и центробежной силе \bar{P}_o в относительном движении. Вер-

шина B прямого угла между векторами \bar{F} и \bar{P}_o лежит на окружности, построенной на векторе \bar{P}_n , как на диаметре. Согласно уравнению (116), $\bar{F} = -\bar{P}_a$, поэтому уравнение (126) можно представить так:

$$m\omega^2 \bar{R} + m\omega^2 \bar{\rho} = m\omega^2 \bar{r}$$

или после сокращения на $m\omega^2$

$$\bar{R} + \bar{\rho} = \bar{r} \quad (127)$$

Умножая все слагаемые уравнения (127) на ω или ω^2 , можно получить соотношения соответственно между векторами скоростей и ускорений частицы в переносном, относительном и абсолютном движениях

$$\omega \bar{R} + \omega \bar{\rho} = \omega \bar{r} \quad (128)$$

и

$$\omega^2 \bar{R} + \omega^2 \bar{\rho} = \omega^2 \bar{r} \quad (129)$$

Таким образом, векторный треугольник можно рассматривать как план скоростей и ускорений в соответствующих масштабах.

При постепенном увеличении ускорения $\omega^2 R$ (например, вследствие увеличения ω при $R = \text{const}$) от 0 до $(\omega^2 R)_0 = gf$ относительного движения нет, и точка B совпадает с точкой A .

При дальнейшем увеличении $\omega^2 R$ точка B перемещается по дуге окружности радиуса $\frac{R}{2}$ от точки A к точке O , с которой совпадает при $\omega^2 R \rightarrow \infty$; при этом радиус относительной траектории ρ увеличивается, стремясь к R , а радиус абсолютной траектории r уменьшается, стремясь к нулю.

Заметим, что при $R\omega^2 > (R\omega^2)_0$, согласно уравнению (123), радиус абсолютной траектории не зависит от амплитуды R круговых колебаний опорной поверхности, а угол δ между векторами \bar{R} и \bar{r} определяется из условия

$$\cos \delta = \frac{r}{R} = \frac{r\omega^2}{R\omega^2} = \frac{gf}{R\omega^2},$$

что совпадает с формулой (120).

Движение системы двух плоских частиц. Рассмотрим на горизонтальной опорной поверхности, совершающей горизонтальные круговые поступательные колебания, систему из двух тонких, расположенных одна на другой пластин, связанных в горизонтальной плоскости между собой и с опорной поверхностью силами сухого трения (рис. 26). Обозначим m_n и m_b — массы соответственно верхней и нижней пластин, а f_n и f_b — коэффициенты трения соответ-

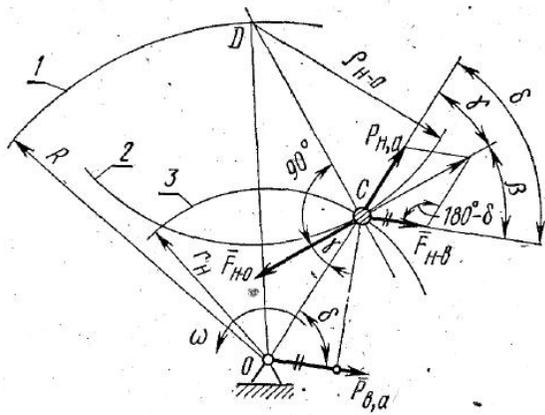


Рис. 26. Схема движения двух слоев при круговых колебаниях в горизонтальной плоскости:

1 — траектория точки D опорной поверхности; 2 — траектория центра масс нижней пластины в относительном движении по опорной поверхности; 3 — траектория центра масс нижней пластины в абсолютном движении.

ной поверхностью служит нижняя пластина. Поэтому абсолютная сила инерции верхней пластины $\bar{P}_{в,а} = m_{в}\omega^2\bar{r}_{в}$ отстает по фазе от абсолютной силы инерции нижней пластины $\bar{P}_{н,а}$ на угол δ , определяемый согласно уравнению (120) по формуле

$$\cos \delta = \frac{gf_{в}}{r_{н}\omega^2}. \quad (130)$$

Сила трения $\bar{F}_{н-в}$, действующая на нижнюю пластину со стороны верхней, равна силе инерции $\bar{P}_{в,а}$ верхней пластины, так как обе они равны и противоположны силе трения $\bar{F}_{в-н}$, действующей со стороны нижней пластины на верхнюю, т. е.

$$\bar{F}_{н-в} = \bar{P}_{в,а} = -\bar{F}_{в-н}.$$

Условия динамического равновесия нижней пластины, центр масс которой показан на рисунке 26 в точке C , будут

$$\bar{P}_{н,а} + \bar{F}_{н-в} + \bar{F}_{н-о} = 0, \quad (131)$$

где

$$P_{н,а} = m_{н}\omega^2 r_{н};$$

$$F_{н-о} = g(m_{н} + m_{в})f_{н};$$

$$F_{н-в} = gm_{в}f_{в}.$$

венно верхней пластины по нижней и нижней пластины по опорной поверхности.

Будем рассматривать предельное движение системы, при котором каждая из пластин совершает круговые поступательные колебания, причем верхняя пластина скользит относительно нижней, а нижняя — относительно опорной поверхности.

В таком случае условия движения верхней пластины ничем не отличаются от рассмотренных выше условий движения плоской материальной частицы, для которой опор-

Вектор силы $\bar{F}_{н-в}$ равен и противоположен диагонали параллелограмма, построенного на векторах $\bar{F}_{н-в}$ и $\bar{P}_{н,а}$, как на сторонах. Поэтому, решая косоугольный треугольник, запишем

$$F_{н-о}^2 = P_{н,а}^2 + F_{н-в}^2 - 2P_{н,а}F_{н-в}\cos(180^\circ - \delta).$$

Подставляя в это уравнение значения сил и $\cos \delta$, получим после преобразований

$$r_{н} = \frac{gf_{н}}{\omega^2} \sqrt{\left(\frac{f_{в}}{f_{н}}\right)^2 + \left(1 + \frac{m_{в}}{m_{н}}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{f_{в}}{f_{н}}\right)^2\right]}. \quad (132)$$

Обозначим

$$\mu = \frac{m_{в}}{m_{н}}; \quad \nu = \frac{f_{в}}{f_{н}};$$

$$k = \sqrt{\nu^2 + (1 + \mu)^2(1 - \nu^2)}. \quad (133)$$

Тогда формулу (132) можно переписать в следующем виде:

$$r_{н} = \frac{gf_{пр}}{\omega^2}, \quad (134)$$

где $f_{пр} = f_{н}k$ — приведенный коэффициент трения нижней пластины по опорной поверхности.

Из формулы (133) видно, что при $\nu \leq 1$ безразмерный коэффициент k не может быть меньше единицы; он увеличивается с увеличением μ и уменьшением ν .

Таким образом, сопротивление относительному движению нижней пластины по опорной поверхности увеличивается с возрастанием массы верхней пластины относительно нижней и с уменьшением коэффициента трения между пластинами. Это объясняется тем, что нормальная реакция опорной поверхности увеличивается пропорционально силе тяжести верхней пластины, масса же последней увеличивает инертность системы в меньшей степени вследствие относительного скольжения пластин.

Если $\nu \geq 1$, т. е. коэффициент трения между пластинами не меньше, чем коэффициент трения нижней пластины по опорной поверхности, то $k=1$, и обе пластины движутся как одно целое.

Если постепенно увеличивать ускорение опорной поверхности в случае $\nu < 1$, то первоначально начинает относительное движение верхняя пластина при

$$(\omega^2 R)_{кр1} = gf_{в}, \quad (135)$$

а затем нижняя при

$$(\omega^2 R)_{кр2} = gf_{пр}. \quad (136)$$

При $(\omega^2 R) > (\omega^2 R)_{кр2}$ центр масс C нижней пластины в относительном движении описывает окружность радиуса $\rho_{н-о}$ вокруг точки D опорной поверхности. В свою очередь, все точки опорной поверхности описывают окружности радиуса R , причем для точки D центром такой окружности будет неподвижная точка O . Чтобы определить положение точки D , учтем также, что она должна лежать на перпендикуляре из точки C к силе трения $F_{н-о}$, противоположной относительной скорости. На рисунке 26 точка D и радиус $\rho_{н-о}$ определены графически пересечением перпендикуляра из точки C к $F_{н-о}$ окружностью радиуса R из точки O .

Для аналитического определения $\rho_{н-о}$ рассмотрим ΔOCD , в котором угол при вершине C равен $(90^\circ + \gamma) = [90^\circ - (\delta - \beta)]$, где угол β найдем, проектируя все силы на линию действия $F_{н-в}$,

$$F_{н-о} \cos \beta = P_{н,в} \cos \delta + F_{н-в}.$$

Подставляя значения всех сил и $\cos \delta$ из формулы (130), находим

$$\cos \beta = \frac{m_n \omega^2 r_n \frac{gf_{в}}{\omega^2 r_n} + gf_{в} m_{в}}{(m_n + m_{в}) gf_n} = \frac{f_{в}}{f_n} = \nu \quad (137)$$

из ΔOCD

$$R^2 = \rho_{н-о}^2 + r_n^2 - 2\rho_{н-о} r_n \cos(90^\circ \pm \gamma)$$

или

$$\rho_{н-о}^2 + 2\rho_{н-о} r_n \sin(\delta - \beta) - (R^2 - r_n^2) = 0.$$

Решая последнее уравнение относительно $\rho_{н-о}$, после подстановки r_n из уравнения (134) получим

$$\rho_{н-о} = R \left[\sqrt{1 - \left(\frac{gf_{пр}}{\omega^2 R}\right)^2 \cos^2(\delta - \beta)} - \frac{gf_{пр}}{\omega^2 R} \sin(\delta - \beta) \right]. \quad (138)$$

При $gf_{пр} = \omega^2 R$ нижняя пластина движется вместе с опорной поверхностью и $\rho_{н-о} = 0$.

Пример. Рассмотрим движение системы из двух пластин при следующих условиях:

$$f_{в} = 0,6; \quad f_n = 0,8; \quad \mu = \frac{m_{в}}{m_n} = 1; \quad \nu = \frac{f_{в}}{f_n} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75;$$

$$\omega = 24c^{-1}; \quad R = 0,045 \text{ м} = 45 \text{ мм.}$$

Параметры, характеризующие движение нижней пластины

$$k = \sqrt{\nu^2 + (1 + \mu)^2(1 - \nu^2)} = \sqrt{0,75^2 + (1 + 1)^2(1 - 0,75^2)} \approx 1,52;$$

$$f_{пр} = f_n k = 0,8 \cdot 1,52 = 1,22;$$

$$r_n = \frac{gf_{пр}}{\omega^2} = \frac{9,81 \cdot 1,22}{24^2} \approx 0,0208 \text{ м} = 20,8 \text{ мм};$$

$$\cos \delta = \frac{gf_{в}}{r_n \omega^2} = \frac{9,81 \cdot 0,6}{0,0208 \cdot 24^2} \approx 0,493; \quad \delta = 60^\circ 27';$$

$$\beta = \arccos \nu = \arccos 0,75 = 41^\circ 20'; \quad \delta - \beta = 19^\circ 0,7';$$

$$\begin{aligned} \rho_{н-о} &= R \left[\sqrt{1 - \left(\frac{gf_{пр}}{\omega^2 R}\right)^2 \cos^2(\delta - \beta)} - \frac{gf_{пр}}{\omega^2 R} \sin(\delta - \beta) \right] = \\ &= 0,045 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{9,81 \cdot 1,22}{24^2 \cdot 0,045}\right)^2 \cos^2 19^\circ 0,7'} - \frac{9,81}{24^2 \cdot 0,045} \sin 19^\circ 0,7'} \right] \approx \\ &\approx 0,0337 \text{ м} = 33,7 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Параметры, характеризующие движение верхней пластины

$$r_{в} = \frac{gf_{в}}{\omega^2} = \frac{9,81 \cdot 0,6}{24^2} = 0,0108 \text{ м} = 10,8 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned} \rho_{в-н} &= r_n \sqrt{1 - \left(\frac{gf_{в}}{\omega^2 r_n}\right)^2} = 0,0208 \sqrt{1 - \left(\frac{9,81 \cdot 0,6}{24^2 \cdot 0,0208}\right)^2} \approx \\ &\approx 0,0182 \text{ м} = 18,2 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Значения критических ускорений

$$(\omega^2 R)_{кр1} = gf_{в} = 9,81 \cdot 0,6 \approx 5,9 \text{ м/с}^2;$$

$$(\omega^2 R)_{кр2} = gf_{пр} = 9,81 \cdot 1,22 \approx 12 \text{ м/с}^2.$$

Значение скоростей в абсолютном и относительном движении каждой пластины можно определить умножением соответствующих радиусов на угловую скорость ω .

Послойное движение сыпучего материала. При достаточной площади горизонтальной опорной поверхности, совершающей круговые поступательные колебания, сыпучий материал располагается на ней в виде сыпучего тела, толщину которого будем считать одинаковой над всеми точками поверхности, так же как гранулометрический состав и свойства частиц. Частицы, расположенные в верхнем слое сыпучего тела, отличаются большей подвижностью по сравнению с частицами внутри сыпучего тела и особенно с частицами нижнего слоя. Это объясняется увеличением числа связей частиц по мере удаления их от свободной поверхности и при теоретическом рассмотрении может быть учтено увеличением коэффициентов трения нижележащих слоев.

Полагая толщину сыпучего тела намного меньшей горизонтальных размеров опорной поверхности, рассмотрим его как совокуп-

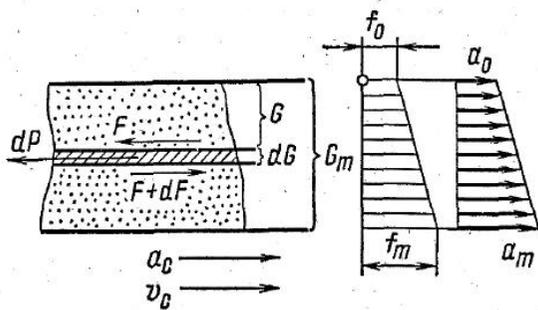


Рис. 27. Схема послыоного движения сыпучего тела при прямолинейном ускоренном движении.

на схема послыоного движения сыпучего тела при прямолинейном равноускоренном движении опорной поверхности; с наибольшими скоростью и ускорением движется нижний слой, с наименьшими — верхний.

Рассмотрим условия динамического равновесия элементарного слоя внутри сыпучего тела, скорость которого больше, чем вышележащего, но меньше, чем нижележащего. Поэтому сила трения F со стороны вышележащего слоя препятствует движению, а сила трения $F+dF$ со стороны нижележащего слоя способствует движению. Разность этих сил уравновешена силой инерции

$$dP_n = -\frac{dG}{g}a,$$

где a — ускорение рассматриваемого слоя.

Имеем $dP=dF$ или $\frac{a}{g}dG = dF$, откуда

$$a = g \frac{dF}{dG}. \quad (139)$$

Так как $F=fG$, то

$$\frac{dF}{dG} = f + G \frac{df}{dG} = f_{пр}. \quad (140)$$

где f — коэффициент сопротивления сдвигу в данном слое, а G — сила тяжести вышележащей части сыпучего тела.

Поскольку f — это возрастающая функция G , то приведенный коэффициент сопротивления сдвигу слоев $f_{пр} > f$ и тоже возрастает, но более прогрессивно по мере приближения слоя к опорной поверхности. Для зерна и продуктов его переработки зависимость $f(G)$ близка к линейной и аппроксимируется уравнением

$$f = f_0 + cG. \quad (141)$$

ность бесконечно большого числа слоев — пластин, равных по силе тяжести dG (отнесенной к единице опорной площади). При этом примем коэффициент сопротивления сдвигу слоев (коэффициент трения) непрерывной возрастающей функцией силы тяжести вышележащей части сыпучего тела.

На рисунке 27 показана

Введем обозначения

$$j = \frac{G}{G_m} \text{ и } \xi = \frac{f_m - f_0}{f_0},$$

где G и G_m — давления соответственно вышележащей части и всего сыпучего тела; f_0 и f_m — коэффициенты сопротивления сдвигу соответственно верхнего и нижнего слоев.

Тогда зависимости (141) и (140) принимают соответственно вид

$$f = f_0(1 + j\xi) \quad (142)$$

и

$$f_{пр} = f_0(1 + 2j\xi). \quad (143)$$

Так как на нижний элементарный слой при предельном установившемся движении системы действуют в горизонтальной плоскости постоянные силы трения, то при круговых колебаниях опорной поверхности их равнодействующую можно рассматривать как центростремительную силу. Тогда все элементарные слои, как бесконечно тонкие пластины, совершают круговое поступательное движение, характеризуемое радиусами r , вокруг неподвижных точек.

Рассмотрим внутри сыпучего тела элементарный n -й слой, взаимодействующий с вышележащим $(n-1)$ и нижележащим $(n+1)$ слоями. На рисунке 28 центры масс n -го и $(n-1)$ слоев показаны соответственно в точках A_n и A_{n-1} , равномерно движущихся по окружностям радиусов r_n и r_{n-1} вокруг неподвижной точки O с угловой скоростью ω . Отрезок $A_n A_{n-1}$ — это радиус траектории одного слоя относительно другого, и поэтому ему перпендикулярны силы трения F_n и F_{n-1} [действие и равное ему противодействие n -го и $(n-1)$ слоев]. Принимаем элементарные массы всех слоев равными $\frac{\Delta G}{g}$, замечаем, что силы инерции

$$\Delta P_n = \frac{\Delta G}{g} \omega^2 r_n \text{ и } \Delta P_{n-1} = \frac{\Delta G}{g} \omega^2 r_{n-1}$$

пропорциональны радиусам траекторий в абсолютном движении r_n и r_{n-1} , вследствие чего проекции ΔP_F этих сил на линию действия сил F_n и F_{n-1} равны.

На n -й слой действуют следующие силы:

F_{n+1} — сила трения о нижний $(n+1)$ слой;

F_n — сила трения о вышележащий n -й слой;

ΔP_n — сила инерции.

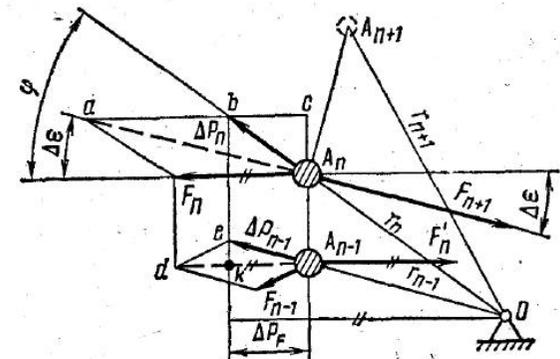


Рис. 28. Схема сил, действующих на два смежных слоя внутри сыпучего тела.

На $(n-1)$ слой действуют следующие силы:

$F'_n > F_n$ — сила трения о нижележащий n -й слой;

F_{n-1} — сила трения о вышележащий $(n-1)$ слой;

ΔP_{n-1} — сила инерции.

Для каждого из этих слоев сила трения о нижележащий слой равна и противоположна диагонали параллелограмма, стороны которого — это сила инерции и сила трения о вышележащий слой.

Для n -го слоя из $\Delta A_n ac$ и $\Delta A_n bc$

$$(\Delta P_n)^2 = F_{n+1} - (F_n + \Delta P_F)^2 + \Delta P_F^2 \quad (144)$$

Для $(n-1)$ слоя из $\Delta A_{n-1} ke$ и Δdke

$$(\Delta P_{n-1})^2 = F_{n-1}^2 - (F_n - \Delta P_F)^2 + \Delta P_F^2 \quad (145)$$

Складывая уравнения (144) и (145), получаем после приведения подобных членов

$$(\Delta P_n)^2 + (\Delta P_{n-1})^2 = (F_{n+1}^2 - F_n^2) - (F_n^2 - F_{n-1}^2) \quad (146)$$

Правая часть уравнения (146) — это разность $\Delta F_n^2 - \Delta F_{n-1}^2$ двух последовательных приращений непрерывной функции F^2 аргумента G , и ее можно записать как $\Delta^2 F^2$.

Левую часть, пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка, чем $(\Delta P)^2$, можно записать как $2(\Delta P)^2$.

Тогда

$$(\Delta P)^2 = \frac{1}{2} \Delta^2 F^2 \quad (147)$$

Так как $\Delta P = \frac{\Delta G}{g} \omega^2 r$, то

$$r^2 = \frac{g^2}{2\omega^4} \cdot \frac{\Delta^2 F^2}{\Delta G^2},$$

что при $\Delta G \rightarrow 0$ позволяет записать

$$r = \frac{g}{\omega^2} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{d^2 F^2}{dG^2}} \quad (148)$$

После двукратного дифференцирования получим окончательно

$$r = \frac{g}{\omega^2} \sqrt{F \frac{d^2 F}{dG^2} + \left(\frac{dF}{dG}\right)^2} \quad (149)$$

Проекцией геометрического места концов вектора r на опорную горизонтальную поверхность будет кривая $A_0 A_m$ (рис. 29) как пре-

дельное очертание ломаной линии $A_{n-1} A_n A_{n+1}$ (см. рис. 28), причем в каждой точке этой кривой нормаль $n-n$ определяет линию действия силы трения смежных слоев. Угол φ между нормалью и радиусом r (см. рис. 29) определим из условий динамического равновесия

массы $\Delta m = \frac{\Delta G}{g}$ n -го

слоя. Проектируя силы F_{n+1} и ΔP_n на линию действия силы F_n и на перпендикуляр к ней, получим

$$\Delta P_n \cos \varphi + F_n - F_{n+1} \cos \Delta \varepsilon = 0; \quad (150)$$

$$\Delta P_n \sin \varphi - F_{n+1} \sin \Delta \varepsilon = 0. \quad (151)$$

Представляя $F_{n+1} = F_n + \Delta F$ и пренебрегая величинами более высокого порядка малости, чем $\Delta \varepsilon$, получим

$$\cos \varphi = \frac{\Delta F_n}{\Delta P} \quad \text{и} \quad \Delta \varepsilon \approx \sin \Delta \varepsilon = \frac{\Delta P \sin \varphi}{F_n}.$$

Учитывая, что $\Delta P = \frac{\Delta G}{g} \omega^2 r$, и, переходя к пределу при $\Delta G \rightarrow 0$, запишем

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{g}{\omega^2 r} \cdot \frac{dF}{dG}; \\ d\varepsilon &= \frac{r \omega^2}{g} \cdot \frac{dG}{F} \sin \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (152)$$

Подставляя значение r из уравнения (149) и выражая $\sin \varphi$ из уравнения (152), получим после преобразований

$$d\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{F} \left(\frac{d^2 F}{dG^2} \right)} dG \quad (153)$$

Полученные формулы позволяют получить уравнения кривой $A_0 A_m$ в полярных координатах в параметрической форме:

$$\alpha = \varphi + \varepsilon = \arccos \frac{g}{\omega^2 r} \cdot \frac{dF}{dG} + \int_0^a \sqrt{\frac{1}{F} \frac{d^2 F}{dG^2}} dG \quad (154)$$

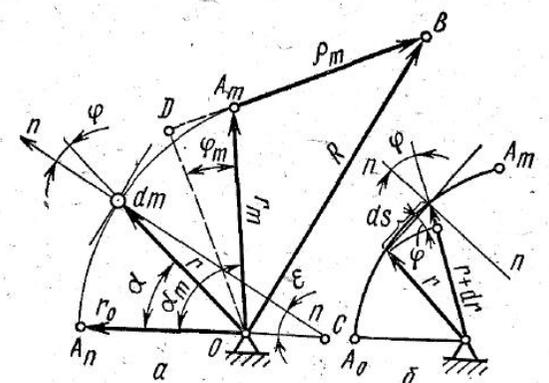


Рис. 29. Геометрическое место радиусов-векторов траекторий центров масс слоев: а — общая картина; б — схема к определению интенсивности последующего движения.

После подстановки r из уравнения (149) получим окончательно

$$\alpha = \arccos \frac{\frac{dF}{dG}}{\sqrt{F \left(\frac{d^2F}{dG^2} \right) + \left(\frac{dF}{dG} \right)^2}} + \int_0^\alpha \sqrt{\frac{1}{F} \left(\frac{d^2F}{dG^2} \right)} dG. \quad (155)$$

Для верхнего слоя $G = 0$, $f = f_0$ и согласно уравнению (140) $\frac{dF}{dG} = f_0$, а $\frac{d^2F}{dG^2} = 0$, поэтому из уравнений (149), (152) и (155)

$$r_0 = \frac{g f_0}{\omega^2}; \quad (156)$$

$$\alpha_0 = \varphi_0 = 0. \quad (157)$$

Для нижнего слоя $G = G_m$, $F = F_m$ и значения r_m и α_m можно определить подстановкой соответствующих значений $\left(\frac{dF}{dG} \right)_m$ и $\left(\frac{d^2F}{dG^2} \right)_m$ в формулы (149) и (155).

Радиус относительной траектории нижнего слоя по опорной поверхности ρ_m определим, учитывая, что он должен быть перпендикулярен силе трения нижнего слоя, направленной по нормали к кривой A_0A_m в точке A_m . Поэтому проведем к кривой A_0A_m в точке A_m касательную до пересечения с окружностью радиуса R из точки O . Точка пересечения B — это центр относительной траектории центра масс нижнего слоя на опорной поверхности, а $\rho_m = A_mB$. Перпендикуляр OD из точки O на касательную A_mB образует с радиусом r_m угол φ_m , поэтому из прямоугольных треугольников ODB и ODA определим

$$\rho_m = \sqrt{R^2 - (r_m \cos \varphi_m)^2} = \sqrt{r_m^2 - (r_m \cos \varphi_m)^2}.$$

Согласно формуле (152),

$$r_m \cos \varphi_m = \frac{g}{\omega^2} \left(\frac{dF}{dG} \right)_m,$$

поэтому, учитывая уравнение (149), после подстановок и преобразований получим

$$\rho_m = R \left[\sqrt{1 - \left(\frac{g}{\omega^2 R} \right)^2 \left(\frac{dF}{dG} \right)_m^2} - \frac{g}{\omega^2 R} \sqrt{F_m \left(\frac{d^2F}{dG^2} \right)_m} \right]. \quad (158)$$

Скорости точек нижнего слоя в абсолютном и относительном движении можно определить умножением угловой скорости ω соответственно на r_m и ρ_m . Так как скорость точек в любом слое про-

порциональна радиусу r , то кривую $r(\alpha)$ можно рассматривать как горизонтальную проекцию годографа скоростей всех слоев, изменив соответствующим образом масштаб и считая его повернутым на угол 90° по ω относительно кривой $r(\alpha)$. Пространственная картина скоростей по всей толщине сыпучего тела показана на рисунке 30.

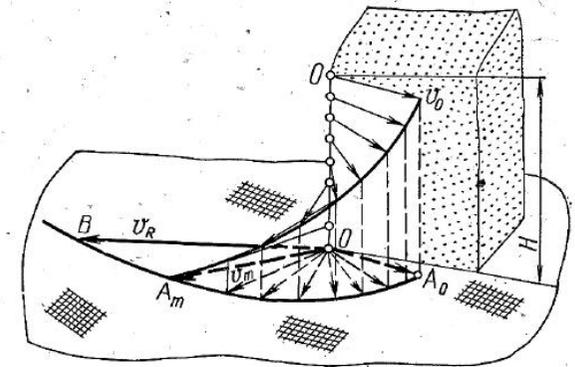


Рис. 30. Распределение скоростей элементарных слоев по высоте сыпучего тела.

Разрыхление и процесс самосортирования в сыпучем теле, состоящем из частиц одинаковой плотности, но различных размеров, зависят от интенсивности полойного движения, определяемой как относительная скорость двух смежных слоев, деленная на силу тяжести элементарного слоя dG ,

$$I = \frac{dv}{dG}. \quad (159)$$

Если радиусы траекторий смежных слоев в абсолютном движении равны r и $r + dr$ (см. рис. 28 и 29, б), то радиус их траектории в относительном движении составляет $ds = \frac{dr}{\sin \varphi}$. Поэтому

$$dv = \omega ds = \frac{\omega dr}{\sin \varphi} \quad \text{и} \quad I = \frac{\omega}{\sin \varphi} \cdot \frac{dr}{dG}. \quad (160)$$

Продифференцируем выражение (149)

$$\frac{dr}{dG} = \frac{g}{2\omega^2} \cdot \frac{F \frac{d^3F}{dG^3} + 3 \frac{dF}{dG} \cdot \frac{d^2F}{dG^2}}{\sqrt{F \frac{d^2F}{dG^2} + \left(\frac{dF}{dG} \right)^2}}. \quad (161)$$

Выражая $\sin \varphi$ через $\cos \varphi$, получим из уравнения (152)

$$\sin \varphi = \frac{\sqrt{F \frac{d^2F}{dG^2}}}{\sqrt{F \frac{d^2F}{dG^2} + \left(\frac{dF}{dG} \right)^2}}. \quad (162)$$

Тогда уравнение (160) принимает вид

$$I = \frac{g}{2\omega} \cdot \frac{F \frac{d^3 F}{dG^3} + 3 \frac{dF}{dG} \cdot \frac{d^2 F}{dG^2}}{\sqrt{F \frac{d^2 F}{dG^2}}}, \quad (163)$$

где F и G — соответственно сила трения и сила тяжести вышележащего сыпучего тела над рассматриваемым слоем, отнесенные к единице площади опорной поверхности.

Так как сила трения F и ее производные при $\omega^2 R > (\omega^2 R)_{кр}$ не зависят от кинематических параметров, то интенсивность послыжного движения обратно пропорциональна ω , а следовательно, при $\omega^2 R = \text{const}$ пропорциональна \sqrt{R} .

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Послыжное движение сыпучего тела при достаточной площади опорной горизонтальной поверхности возможно только при условии, что коэффициент сопротивления сдвигу нижнего слоя больше коэффициентов сопротивления сдвигу вышележащих слоев.

2. При постепенном увеличении ускорения опорной поверхности относительное движение слоев сыпучего тела начинается сверху при первом критическом ускорении $(\omega^2 R)_{кр1} = g f_0$ и постепенно распространяется вниз; при втором критическом ускорении

$(\omega^2 R)_{кр2} = g \sqrt{F_m \left(\frac{d^2 F}{dG^2} \right)_m + \left(\frac{dF}{dG} \right)_m^2}$ начинается относительное движение нижнего слоя по опорной поверхности. В области ускорений $(\omega^2 R)_{кр1} < \omega^2 R < (\omega^2 R)_{кр2}$ послыжное движение происходит только в части сыпучего тела.

3. Интенсивность послыжного движения при $\omega^2 R > (\omega^2 R)_{кр2}$ обратно пропорциональна угловой скорости ω и в среднем для всего сыпучего тела имеет максимум при $(\omega^2 R)_{кр2}$.

4. Скорость частиц нижнего слоя относительно опорной поверхности при неизменном ускорении $\omega^2 R$ пропорциональна радиусу R колебаний опорной поверхности.

Полученные формулы, характеризующие послыжное движение в сыпучем теле, справедливы при указанных выше условиях для любой зависимости $f(G)$, если она монотонно возрастает. Для зерна и продуктов его переработки $f(G)$ в известных пределах толщины H сыпучего тела близка к линейной. Тогда параметры его послыжного движения можно выразить через показатели механических свойств

f_0 и ξ и переменную $j = \frac{G}{G_m}$, которую, пренебрегая изменением плотности по высоте сыпучего тела, можно рассматривать как безразмерную координату $j = \frac{h}{H}$,

где h — толщина сыпучего тела над рассматриваемым слоем.

Заметим, что для верхнего слоя $j = 0$, а для нижнего $j = 1$. В этом случае для координаты $0 < j < 1$ согласно формуле (142)

$$f = f_0(1 + \xi j); \quad F = G_m f_0(1 + \xi j)j; \quad (164)$$

$$\frac{dF}{dG} = f_0(1 + 2\xi j); \quad (165)$$

$$\frac{d^2 F}{dG^2} = 2 \frac{f_0 \xi}{G_m} = \text{const}; \quad (166)$$

$$\frac{d^3 F}{dG^3} = 0. \quad (167)$$

Подставляя значения F и ее производных в формулы (149) и (154), получаем после интегрирования и преобразований параметрические уравнения кривой $r(\alpha)$

$$r = \frac{g f_0}{\omega^2} \sqrt{1 + 6\xi(1 + \xi)j}; \quad (168)$$

$$\alpha = \sqrt{2} \ln \left[1 + 2\xi j + 2\sqrt{\xi(1 + \xi)j} \right] + \arccos \frac{1 + 2\xi j}{\sqrt{1 + 6\xi(1 + \xi)j}}. \quad (169)$$

Критические значения ускорений опорной поверхности, определяющие начало послыжного движения в сыпучем слое и начало относительного движения нижнего слоя по опорной поверхности, соответственно будут

$$(\omega^2 R)_{кр1} = g f_0;$$

$$(\omega^2 R)_{кр2} = g f_0 \sqrt{1 + 6\xi(1 + \xi)}. \quad (170)$$

Для области $(\omega^2 R) > (\omega^2 R)_{кр2}$ радиус относительной траектории нижнего слоя по опорной поверхности

$$\rho_m = R \left[\sqrt{1 - \left(\frac{g f_0}{\omega^2 R} \right)^2 (1 + 2\xi)^2} - \frac{g f_0}{\omega^2 R} \sqrt{2\xi(1 + \xi)} \right]. \quad (171)$$

При этом относительная скорость частиц нижнего слоя составляет

$$v_m = \omega \rho_m = \omega R \left[\sqrt{1 - \left(\frac{g f_0}{\omega^2 R} \right)^2 (1 + 2\xi)^2} - \frac{g f_0}{\omega^2 R} \sqrt{2\xi(1 + \xi)} \right]. \quad (172)$$

Интенсивность послыоного движения в слое j определим, подставив в формулу (163) значения F и ее производных. Получим

$$I = \frac{3gf_0}{G_m\omega} \cdot \frac{\xi(1+2\xi j)}{\sqrt{2\xi(1+\xi)j}}. \quad (173)$$

В качестве характеристики послыоного движения сыпучего тела в целом введем среднюю интенсивность послыоного движения

$$I_{cp} = \frac{1}{G_m} \int_0^1 IdG = \int_0^1 I(j) dj. \quad (174)$$

Подставляя $I(j)$ из уравнения (173), получим после интегрирования и преобразований

$$I_{cp} = \frac{3gf_0}{G_m\omega} \sqrt{2\xi(1+\xi)}. \quad (175)$$

Для увеличения интенсивности послыоного движения целесообразно уменьшить угловую скорость ω до предела, соответствующего распространению этого движения на все сыпучее тело. Такому пределу отвечает второе критическое ускорение $(\omega^2 R)_{кр2}$ согласно уравнению (170); из этого же уравнения

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{gf_0}{R}} \sqrt[4]{1+6\xi(1+\xi)}, \quad (176)$$

и после подстановки в формулу (175) получаем максимальное значение средней интенсивности послыоного движения

$$(I_{cp})_{max} = \frac{3\sqrt{R}}{G_m} \cdot \frac{\sqrt{2gf_0\xi(1+\xi)}}{\sqrt[4]{1+6\xi(1+\xi)}}. \quad (177)$$

Зависимость средней интенсивности послыоного движения в сыпучем теле (продукты измельчения зерна с $f_0=0,7$ и $\xi=0,2$) от ω при различных R показана на рисунке 31.

Пример. Определить параметры движения слоев пшеницы и дунста соответственно на металлическом и капроновом ситах, пользуясь следующими данными:

$$\omega = 20c^{-1}; \quad R = 0,045 \text{ м};$$

$$G_m = 0,02 \text{ кг/см}^2;$$

для пшеницы $f_{оп} = 0,55$; $\xi_n = 0,4$, для дунста $f_{од} = 0,67$; $\xi_d = 0,17$.

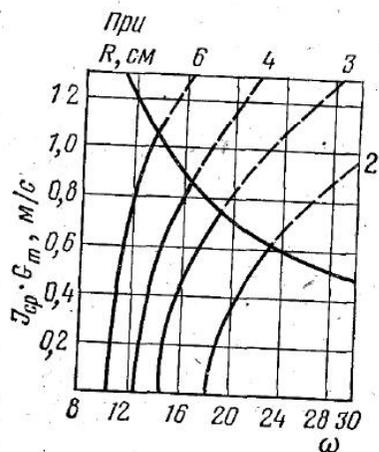


Рис. 31. Кривые зависимости средней интенсивности послыоного движения в сыпучем теле от ω при различных R .

1. Определяем ускорение сита $\omega^2 R = 20^2 \cdot 0,045 = 18 \text{ м/с}^2$ и сравниваем его со вторым критическим ускорением

$$(\omega^2 R)_{кр2} = gf_0 \sqrt{1+6\xi(1+\xi)},$$

Для пшеницы

$$(\omega^2 R)_{кр2} = 9,81 \cdot 0,55 \sqrt{1+6 \cdot 0,4(1+0,4)} \approx 11,3 \text{ м/с}^2.$$

Для дунста

$$(\omega^2 R)_{кр2} = 9,81 \cdot 0,67 \sqrt{1+6 \cdot 0,17(1+0,17)} \approx 9,7 \text{ м/с}^2.$$

В обоих случаях послыоное движение происходит во всем сыпучем теле, и нижний слой совершает движение относительно сита.

2. Определяем радиусы траекторий и скорости частиц нижнего слоя по ситу

$$\rho_m = R \sqrt{1 - \left(\frac{gf_0}{\omega^2 R}\right)^2 (1+2\xi)^2} - \frac{gf_0}{\omega^2 R} \sqrt{2\xi(1+\xi)}.$$

Для пшеницы

$$\rho_{мп} = 0,045 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{9,81 \cdot 0,55}{20^2 \cdot 0,045}\right)^2 (1+2 \cdot 0,4)^2} - \frac{9,81 \cdot 0,55}{20^2 \cdot 0,045} \sqrt{2 \cdot 0,4(1+0,4)} \right] \approx 0,0171 \text{ м} = 17,1 \text{ мм};$$

$$v_{мп} = \omega \rho_{мп} = 20 \cdot 0,0171 = 0,342 \text{ м/с}.$$

Для дунста

$$\rho_{мд} = 0,045 \left[\sqrt{1 - \left(\frac{9,81 \cdot 0,67}{20^2 \cdot 0,045}\right)^2 (1+2 \cdot 0,17)^2} - \frac{9,81 \cdot 0,67}{20^2 \cdot 0,045} \sqrt{2 \cdot 0,17(1+0,17)} \right] \approx 0,029 \text{ м} = 29 \text{ мм};$$

$$v_{мд} = \omega \rho_{мд} = 20 \cdot 0,029 = 0,58 \text{ м/с}.$$

3. Определяем среднюю интенсивность послыоного движения

$$I_{cp} = \frac{3gf_0}{G_m\omega} \sqrt{2\xi(1+\xi)}.$$

Для пшеницы

$$I_{cp.п} = \frac{3 \cdot 9,81 \cdot 0,55}{0,02 \cdot 20} \sqrt{2 \cdot 0,4(1+0,4)} = 42,8 \text{ м/с/кг/см}^2.$$

Для дунста

$$I_{cp.д} = \frac{3 \cdot 9,81 \cdot 0,67}{0,02 \cdot 20} \sqrt{2 \cdot 0,17(1+0,17)} = 31 \text{ м/с/кг/см}^2.$$

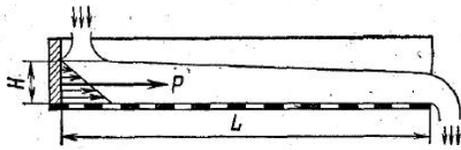


Рис. 32. Схема сыпучего потока в канале при непрерывной подаче продукта.

Расчет по формуле (177) показывает, что при уменьшении угловой скорости ω без изменения R можно увеличить среднюю интенсивность полойного движения до 54 м/с/кг/см² для пшеницы и до 42,3 м/с/кг/см² для дунста.

Транспортирование сыпучих материалов в каналах ограниченных размеров. Во всех рассмотренных ранее случаях предельное относительное движение каждой точки системы (материальной частицы, центров масс двух пластин и центров масс элементарных слоев сыпучего тела) происходит по окружности вокруг постоянной точки опорной поверхности.

В реальных условиях сыпучее тело ограничено двумя боковыми и задней вертикальными стенками, образующими вместе с опорной горизонтальной поверхностью (дном или ситом) транспортирующий, или рабочий, канал. Продукт непрерывно поступает в канал вблизи задней стенки и, перемещаясь от нее вдоль канала, сбрасывается с опорной поверхности на противоположном — сходовом конце (рис. 32). При этом движение точек сыпучего тела происходит по окружностям, центры которых равномерно перемещаются от задней стенки к сходовому концу канала. Для сыпучего тела в целом здесь устанавливается нарушение симметрии действующих сил: если нормальные реакции боковых стенок можно считать взаимно уравновешенными, то такая же реакция задней стенки оказывается неуравновешенной, и ее можно считать причиной подачи продуктов вдоль канала. Равнодействующая нормальных реакций задней стенки — это периодическая функция времени вследствие чередующихся «приливов» и «отливов» продукта у этой стенки, но для простоты теоретического исследования примем ее постоянной величиной, равной среднеинтегральному значению, как это сделано в работах [21, 26].

Рассмотрим в первом приближении сыпучее тело как материальную частицу, учтя в числе действующих на нее сил постоянную горизонтальную силу P , действующую вдоль канала в положительном направлении оси x .

Тогда уравнения относительного движения материальной частицы будут отличаться от уравнений (110) и (111) дополнительными слагаемыми $p = \frac{P}{m}$ в проекциях на ось x и примут вид

$$\ddot{x} = \omega^2 R \cos \omega t - gf \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} + p; \quad (178)$$

$$\ddot{y} = \omega^2 R \sin \omega t - gf \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} \quad (179)$$

при условии, что относительная скорость

$$V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \neq 0.$$

Введем безразмерные переменные *

$$u = \frac{\dot{x}}{R\omega}; \quad v = \frac{\dot{y}}{R\omega}; \quad \tau = \omega t \quad (180)$$

и будем рассматривать величину $\mu = \frac{P}{m\omega^2 R}$ как малый параметр, т. е. положим силу P существенно меньшей, чем сила инерции $m\omega^2 R$ в переносном движении. Уравнения (178) и (179) в новых переменных будут

$$\dot{u} = \cos \tau - z \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}} + \mu; \quad (181)$$

$$\dot{v} = \sin \tau - z \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad (182)$$

$$\text{где } z = \frac{gf}{\omega^2 R}. \quad (183)$$

Перейдем от координат u и v к полярным координатам ρ и ψ по формулам

$$u = \rho \cos(\tau - \psi); \quad (184)$$

$$v = \rho \sin(\tau - \psi). \quad (185)$$

Продифференцируем выражения (184) и (185) по переменной τ

$$\dot{u} = \dot{\rho} \cos(\tau - \psi) - \rho(1 - \dot{\psi}) \sin(\tau - \psi); \quad (186)$$

$$\dot{v} = \dot{\rho} \sin(\tau - \psi) + \rho(1 - \dot{\psi}) \cos(\tau - \psi), \quad (187)$$

где в отличие от предыдущего точкой отмечены производные по безразмерному времени τ .

Подставляя значения функций u и v и их производных в системы (181) и (182), получим после преобразований

$$\rho = \cos \psi - z + \mu \cos(\tau - \psi); \quad (188)$$

$$\rho(1 - \dot{\psi}) = \sin \psi - \mu \sin(\tau - \psi). \quad (189)$$

* Здесь воспроизведено с некоторыми упрощениями и только в первом приближении решение системы уравнений (178) и (179), представленное более полно и с большей степенью приближения в статье И. И. Блехмана, Р. Ф. Нагаева, В. Г. Дулаева и В. В. Гортинского [26].

Решение системы в полярных координатах будем искать в виде рядов

$$\rho = \rho_0(\tau) + \mu\rho_1(\tau) + \mu^2\rho_2(\tau) + \dots; \quad (190)$$

$$\psi = \psi_0(\tau) + \mu\psi_1(\tau) + \mu^2\psi_2(\tau) + \dots \quad (191)$$

по степеням малого параметра с 2π — периодическими коэффициентами.

Порождающая система

$$\dot{\rho}_0 = \cos \psi_0 - z; \quad (192)$$

$$\rho_0(1 - \dot{\psi}_0) = \sin \psi_0 \quad (193)$$

допускает стационарное решение

$$\psi_0 = \alpha = \arccos z; \quad (194)$$

$$\rho_0 = \sin \alpha = \sqrt{1 - z^2}, \quad (195)$$

отвечающее при $z < 1$ задаче Н. Е. Жуковского. Дифференцируя уравнения (190) и (191) и делая подстановки в уравнение (188) и (189), приравниваем коэффициенты при одинаковых степенях μ и, ограничиваясь первым приближением, находим отвечающую ему систему

$$\dot{\rho}_1 + \dot{\psi}_1 \sin \alpha = \cos(\tau - \alpha); \quad (196)$$

$$\dot{\psi}_1 \sin \alpha - \rho_1 + \dot{\psi}_1 \cos \alpha = \sin(\tau - \alpha). \quad (197)$$

Периодическими решениями этих уравнений будут соответственно

$$\rho_1 = 2\operatorname{tg} \alpha \cos(\tau - \alpha) + \sin(\tau - \alpha); \quad (198)$$

$$\dot{\psi}_1 = 2 \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha}. \quad (199)$$

Тогда полное решение с первой степенью приближения, согласно уравнениям (188), (189), (192), (193), можно представить в следующем виде, учитывая что $\rho_0 = \sin \alpha$

$$\rho = \sin \alpha + \mu[2 \operatorname{tg} \alpha \cos(\tau - \alpha) + \sin(\tau - \alpha)]; \quad (200)$$

$$\psi = \alpha + 2\mu \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha}. \quad (201)$$

Для перехода к прямоугольным координатам подставим значения (200) и (201) в формулы (184) и (185)

$$u = \{\sin \alpha + \mu[2 \operatorname{tg} \alpha \cos(\tau - \alpha) + \sin(\tau - \alpha)]\} \times \\ \times \cos \left[(\tau - \alpha) - 2\mu \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \right];$$

$$v = \{\sin \alpha + \mu[2 \operatorname{tg} \alpha \cos(\tau - \alpha) + \sin(\tau - \alpha)]\} \times \\ \times \sin \left[(\tau - \alpha) - 2\mu \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \right].$$

Пренебрегая членами, содержащими степени μ больше первой, получим

$$\cos \left[(\tau - \alpha) - 2\mu \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \right] = \cos(\tau - \alpha) + 2\mu \times \\ \times \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \sin(\tau - \alpha);$$

$$\sin \left[(\tau - \alpha) - 2\mu \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \right] = \sin(\tau - \alpha) - 2\mu \times \\ \times \frac{\sin(\tau - \alpha)}{\cos \alpha} \cos(\tau - \alpha).$$

Подставляя эти значения в выражения для u и v , раскрывая скобки и вновь пренебрегая членами с μ^2 , получим после преобразований

$$u = \sin \alpha \cos(\tau - \alpha) + \mu \left[2 \operatorname{tg} \alpha + \frac{1}{2} \sin 2(\tau - \alpha) \right]; \quad (202)$$

$$v = \sin \alpha \sin(\tau - \alpha) + \frac{\mu}{2} [1 - \cos 2(\tau - \alpha)]. \quad (203)$$

Как видно из уравнений (202) и (203), безразмерные скорости частицы в относительном движении вдоль осей X и Y имеют постоянные составляющие соответственно $2\mu \operatorname{tg} \alpha$ и $\frac{\mu}{2}$ и периодически изменяющиеся — с периодами 2π и π . Постоянные составляющие — это средние за период, они определяют толщину слоя сыпучего тела и время пребывания каждой элементарной порции продукта в канале. Имеем

$$u_{cp} = 2\mu \operatorname{tg} \alpha; \quad (204)$$

$$v_{cp} = \frac{\mu}{2}. \quad (205)$$

Таким образом, дополнительная постоянная сила P , действующая по оси X , вызывает среднее за период перемещение частицы не только в направлении этой оси, но и в перпендикулярном к ней направлении.

Согласно равенствам (180)

$$\dot{x}_{\text{ср}} = \omega R u_{\text{ср}} \quad \text{и} \quad \dot{y}_{\text{ср}} = \omega R v_{\text{ср}}.$$

Из уравнений (194) и (195) следует

$$\cos \alpha = z, \quad \sin \alpha = \sqrt{1 - z^2}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{\sqrt{1 - z^2}}{z},$$

а из уравнения (183)

$$z = \frac{gf}{\omega^2 R}.$$

Учитывая, что $\mu = \frac{P}{m\omega^2 R} = \frac{p}{\omega^2 R}$, получим из формул (204) и (205)

$$\dot{x}_{\text{ср}} = \frac{2p}{\omega} \sqrt{\left(\frac{\omega^2 R}{gf}\right)^2 - 1}; \quad (206)$$

$$\dot{y}_{\text{ср}} = \frac{p}{2\omega}. \quad (207)$$

Средняя скорость транспортирования частицы $v_{\text{ср}} = \sqrt{\dot{x}_{\text{ср}}^2 + \dot{y}_{\text{ср}}^2}$ образует с осью X угол β (рис. 33), причем угол β отсчитывают от положительного направления оси X в направлении, противоположном ω . При помощи формул (206) и (207) получаем

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\dot{y}_{\text{ср}}}{\dot{x}_{\text{ср}}} = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\omega^2 R}{gf} \right)^2 - 1 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (208)$$

Напомним, что полученные результаты справедливы при малых значениях параметра μ , т. е. в случае, когда внешняя дополнительная сила P существенно меньше переменной силы инерции $m\omega^2 R$. Кроме того, в выводе мы ограничивались первым приближением, пренебрегая в разложении малого параметра вторыми и более высокими степенями μ . Приближение с любой степенью точности можно получить из работы [26].

Показанные на рисунке 33 петлеобразные траектории точек можно представить как результат наложения на движение по замкнутой траектории, соответствующей периодическим членам в фор-

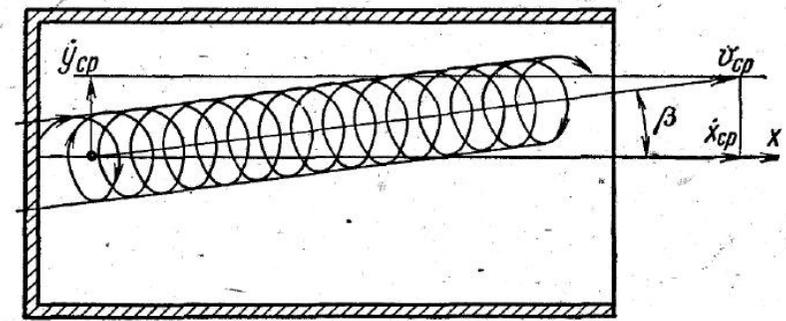


Рис. 33. Траектория частицы в относительном движении с учетом динамического подпора продукта.

мулах (202) и (203), равномерного прямолинейного движения центра этой траектории под углом β к оси X . Замкнутые траектории отличаются от окружностей колебаниями удвоенной частоты, амплитуда которых пропорциональна малому параметру μ . Пренебрегая этими отклонениями (положив $\mu = 0$), вернемся к теореме Н. Е. Жуковского и получим радиус окружности в относительном движении

$$\rho = R \sqrt{1 - \left(\frac{gf}{\omega^2 R}\right)^2}.$$

Рассмотрим установившееся движение потока сыпучего материала в горизонтальном канале шириной B и длиной L в результате непрерывного поступления в него вблизи задней стенки продукта в количестве q_0 кг/мин (см. рис. 32).

Пренебрегаем в первом приближении продольными реакциями боковых стенок и составляющей $\dot{y}_{\text{ср}}$ средней скорости транспортирования в поперечном направлении, а также изменением количества продукта, проходящего за единицу времени через поперечные сечения канала по всей его длине.

Тогда из условий неразрывности потока для любого поперечного сечения

$$q_0 = BH \delta_d \dot{x}_{\text{ср}}, \quad (209)$$

где H — толщина сыпучего тела в канале; δ_d — масса сыпучего материала в единице объема в динамическом состоянии.

Нормальную реакцию задней стенки считаем в среднем за период постоянной и определяем как силу давления, подобную гидравлическому [21]

$$P = \frac{g \delta_d H^2}{2} B. \quad (210)$$

Эту силу будем считать приложенной ко всему сыпучему телу, масса которого в канале составляет

$$m = \delta_d BLH. \quad (211)$$

Из формул (210) и (211)

$$p = \frac{P}{m} = \frac{gH}{2L}. \quad (212)$$

Подставляя p из формулы (212) в уравнение (206) и решая последнее совместно с уравнением (209), получим окончательно

$$\dot{x}_{cp} = \sqrt{\frac{gq_0}{\omega \delta_d BL}} \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{\omega^2 R}{gf}\right)^2 - 1} \quad (213)$$

или

$$H = \left(\frac{\omega L q_0}{g \delta_d B}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{\omega^2 R}{gf}\right)^2 - 1\right]^{\frac{1}{4}}. \quad (214)$$

Как видно из формулы (213), средняя скорость продукта вдоль канала находится в прямой зависимости от производительности q_0 и в обратной — от площади опорной поверхности и средней плотности сыпучего материала.

С увеличением ускорения $\omega^2 R$ средняя скорость \dot{x}_{cp} увеличивается. При $\frac{\omega^2 R}{gf} > 2$ с точностью до 7% можно пренебречь единицей сравнительно с квадратом этой величины и получить приблизительное значение

$$\dot{x}_{cp} \cong \sqrt{\frac{q_0 \omega R}{f \delta_d BL}} \quad (215)$$

и

$$H \cong \sqrt{\frac{q_0 f L}{\delta_d \omega R B}}. \quad (216)$$

Естественно, что при математическом моделировании потока сыпучего материала в канале конечных размеров для получения достаточно простых формул не были учтены некоторые реально действующие факторы. К числу этих факторов следует отнести в первую очередь составляющую средней скорости \dot{y}_{cp} , направленную поперек канала, особенности движения сыпучего тела вблизи стенок и послонное движение. Действием первого из этих факторов объясняется уменьшение толщины сыпучего тела около одной боковой стенки (при правом вращении такая стенка — правая) и соответствующее увеличение толщины сыпучего тела у противоположной боковой стенки. При этом нарушается равенство нормальных реакций боковых стенок, уменьшающее в некоторой степени

«сбегание» продукта вследствие отклонения силы P от продольной оси канала навстречу \dot{y}_{cp} .

Действием второго фактора объясняется увеличение средней за период толщины слоя в средней продольной части канала в результате отбрасывания продукта от боковых стенок; поэтому «эффективная» ширина $B_{эф}$ меньше действительной B примерно на удвоенный радиус относительной траектории.

Непрерывное поступление порций продукта вблизи задней стенки приводит к местному увеличению толщины сыпучего тела, что эквивалентно некоторому уменьшению длины канала.

На сходовом конце канала на расстоянии, несколько большем удвоенного радиуса относительной траектории, сыпучее тело образует «склон» с постепенно уменьшающейся толщиной, что уменьшает сопротивление его сдвигу и сбрасыванию с опорной поверхности.

Особенности транспортирования сыпучего тела вблизи задней стенки и у сходового конца канала В. Г. Дулаев [21] предложил учитывать уменьшением расчетной длины канала вдвое сравнительно с действительной. Таким образом, можно принять для расчетов «эффективную» длину канала $L_{эф} = 0,5L$. По предложению того же автора, послонное движение может быть учтено в значениях приведенного коэффициента трения $f_{пр}$, представленных по его данным в таблице 11.

Таблица 11. Значения $f_{пр}$ для расчета средней скорости зерна и продуктов его переработки

Продукт	Приведенный коэффициент трения $f_{пр}$	Опорная поверхность
Мука	0,90—0,95	Шелковое сито
Мягкий дунст	0,95—1,00	» »
Мелкая крупка	0,85—0,90	» »
Крупная »	0,80—0,90	» »
Исходный продукт:	1,50	Металлотканое сито
II драной системы	0,64	Сплошное металлическое днище
IV » »	1,55	Металлотканое сито
I-й размольной системы	1,25	Капроновое »
I-й шлифовочной системы	1,20	» »
I драной системы при обойном помоле ржи	1,15	Металлотканое »
III драной системы при обойном помоле ржи	1,45	» »
I драной системы при обдирном помоле ржи	1,60	» »
IV драной системы при обдирном помоле ржи	1,10	Шелковое »
Зерно пшеницы	0,68	Сито металлическое штампованное
	0,66	Металлотканое сито
	0,64	Фанера сплошная

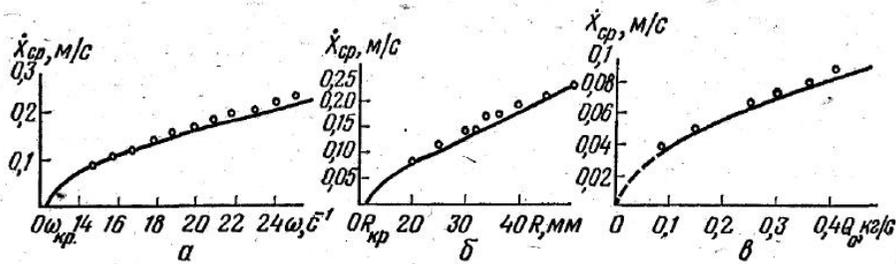


Рис. 34. Кривые зависимости скорости подачи потока от: а — частоты колебаний ω ; б — амплитуды колебаний R ; в — нагрузки Q_0 (q_0).

В работе [21] приведены также эмпирические формулы для определения средней массы в единице объема δ_d с учетом разрыхления продукта

$$\delta_d = \frac{\delta_{ст}}{k}, \quad (217)$$

где коэффициент k определяется в зависимости от относительной скорости ($v_{отн}$, м/с) нижнего слоя продукта

$$k = a + bv_{отн}. \quad (218)$$

Значения коэффициентов a и b при $v_{отн} \neq 0$ для некоторых продуктов следующие:

	a	b
исходные продукты драных систем	1,37	0,08
исходный продукт 1-й размольной системы (мелкая крупка)	0,83	0,54
исходный продукт 1-й шлифовочной системы (крупная крупка)	1,01	1,53
зерно пшеницы	1,05	0,20

В формуле (218)

$$v_{отн} = \omega R \sqrt{\left(\frac{\omega^2 R}{g f_{пр}}\right)^2 - 1}.$$

На графиках рисунка 34 приведены кривые зависимости $\dot{x}_{ср}$ от различных факторов, причем линиями показаны результаты табулирования формулы (213), а отдельными точками — результаты опытов.

Глава 3. СИТОВОЕ СЕПАРИРОВАНИЕ

В общем случае процесс ситового сепарирования можно представить двумя стадиями: самосортирования и просеивания.

В исходной смеси, поступающей на ситовую поверхность, в приемной части рабочего канала частицы, проходowego компонента

распределены по всей толщине образующегося сыпучего тела. Эти частицы, участвуя вместе со всем сыпучим телом в относительном движении по сити, должны в результате самосортирования опуститься на поверхность сита.

Во второй стадии проходовой частицы, продолжая относительное движение в нижнем слое сыпучего тела, проходят над отверстиями и при наступлении благоприятных условий просеиваются.

Если концентрация проходowego компонента в исходной смеси велика, как, например, при очистке зерна от крупных примесей в сепараторе или при контроле муки в отсевах, то самосортирование не оказывает большого влияния на результаты процесса в целом и решающее значение приобретает просеивание.

Если же проходowego компонента немного, а толщина сыпучего тела во много раз больше размеров частицы, то через сито просеиваются лишь частицы, находящиеся в нижнем слое, в который они попадают в результате самосортирования. В этом случае самосортирование приобретает решающее значение.

На эффективность ситового сепарирования в целом влияют многочисленные факторы, характеризующие свойства и концентрацию компонентов смеси и ее поступление в единицу времени: размеры отверстий, материал и конструкция сита; размеры, форма ситового канала и способ очистки сита; кинематический режим рабочего органа. Действие некоторых из этих факторов можно оценить только совокупно, поскольку изменение одного из них может оказать на результаты сепарирования не только прямое влияние, но и косвенное — через изменение других факторов.

Вероятностный характер свойств частиц каждого компонента смеси и многократность взаимодействия их между собой и с поверхностью сита свидетельствуют о влиянии на процесс сепарирования случайных факторов, накладывающих на него черты стохастичности*.

Поэтому многие исследователи для описания результатов ситового сепарирования с успехом применяют теорию случайных процессов марковского типа. Эффективность сепарирования при этом выражают стохастические коэффициенты, которые находят экспериментально в зависимости от перечисленных факторов, что затрудняет определение оптимального соотношения параметров.

Более четко физическую сущность можно выявить при детерминистическом подходе к изучению процесса, когда условия взаимодействия частиц друг с другом и ситовой поверхностью представлены в виде простых моделей, позволяющих применить основные законы механики. Наиболее же правдоподобное описание процесса можно получить, совмещая детерминистический и стохастический подход**.

* «Стохастическое» направление в теории ситового сепарирования получило развитие благодаря трудам Е. А. Непомнящего [49].

** Такой подход обоснован И. И. Блехманом и В. Я. Хайманом [8] и заслуживает дальнейшего развития.

Ниже рассмотрены в детерминистической постановке основные явления на стадиях самосортирования и просеивания, случайный же характер результатов отражен лишь через вероятностные характеристики свойств частиц.

§ 1. Самосортирование частиц по плотности

Рассмотрим в колеблющейся сыпучей среде материальную частицу массы m , размеры которой не меньше размеров окружающих частиц, а плотность ρ больше плотности ρ_0 окружающих частиц. Такой случай характерен, например, для камнеотделительных машин ЗК-15М, БКМ и А1-БОК, в которые направляют зерно, предварительно очищенное на ситовых сепараторах; поэтому оставшиеся минеральные примеси можно считать равновеликими зернам основной культуры и отличающимися от последних большей плотностью.

Движению рассматриваемой частицы относительно окружающей сыпучей среды препятствует сила сопротивления F , которую условно примем одинаковой для случая относительного движения и покоя.

Будем полагать для общности, что вертикальному направлению вектора относительной скорости частицы соответствует большее значение силы сопротивления F_v , чем горизонтальному F_h , что соответствует анизотропности среды. Тогда при произвольном направлении вектора относительной скорости $w \neq 0$ проекции силы сопротивления на координатные оси X, Y, Z (ось Z направлена вниз) определим так [9]:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= -F_h \frac{w_x}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}; & F_y &= -F_h \frac{w_y}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}; \\ F_z &= -F_v \frac{w_z}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (219)$$

Из этих равенств следует

$$\frac{F_x^2}{F_h^2} + \frac{F_y^2}{F_h^2} + \frac{F_z^2}{F_v^2} = 1, \quad (220)$$

т. е. конец вектора силы сопротивления относительно движению лежит на эллипсоиде вращения с горизонтальными полуосями $a = b = F_h$ и вертикальной $c = F_v$ (рис. 35).

Если частица находилась в относительном покое, то ее относительное движение может начаться только в том случае, если равнодействующая всех внешних сил (включая силу инерции в пере-

носном движении), за исключением силы сопротивления среды, выйдет за пределы эллипсоида.

Уравнение относительного движения частицы в векторной форме будет

$$m_1 \bar{w} = m_0(\Delta - 1)(\bar{g} - \bar{u}) + \bar{F}, \quad (221)$$

где $m_1 = m + m'$ — эффективная масса частицы (m — масса частицы; m' — присоединенная масса); \bar{w} — вектор ускорения частицы в относительном движении; m_0 — масса среды в объеме, равном объему частицы; $\Delta = \frac{\rho}{\rho_0}$; \bar{g} — вектор ускорения свободного падения; \bar{u} — вектор ускорения точки среды, с которой в данное мгновение совпадает центр массы частицы.

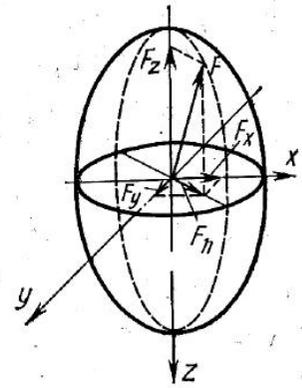


Рис. 35. Эллипсоид предельных сил сопротивления погружению (всплыванию) частицы.

Решим уравнение (221) на примере горизонтальных круговых колебаний среды. Так работают мельничные отсеиватели, камнеотделительные машины ЗК-15М, БКМ и А1-БОК, зерноочистительный сепаратор ЗСШ и т. д.

Проекции на оси X, Y, Z абсолютной скорости точки среды определяются равенствами

$$\left. \begin{aligned} u_x &= -r\omega \sin(\omega t + \alpha); \\ u_y &= r\omega \cos(\omega t + \alpha); & u_z &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (222)$$

где r — радиус траектории точки среды; ω — частота колебаний; α — начальная фаза.

Величины r и α при послойном движении зависят от расстояния до поверхности сита, однако в первом приближении их изменение в уравнениях относительного движения можно не учитывать и записать уравнение (221) в проекциях на координатные оси X, Y, Z в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \dot{w}_x &= m_0(\Delta - 1)r\omega^2 \cos(\omega t + \alpha) - F_h \frac{w_x}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}; \\ m_1 \dot{w}_y &= m_0(\Delta - 1)r\omega^2 \sin(\omega t + \alpha) - F_h \frac{w_y}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}; \\ m_1 \dot{w}_z &= m_0(\Delta - 1)g - F_v \frac{w_z}{\sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (223)$$

Из последнего уравнения системы (223) видно, что ускоренное движение частицы вниз произойдет и при отсутствии относительно-го движения в горизонтальной плоскости ($\omega_x=0$ и $\omega_y=0$), если

$$m_0(\Delta - 1)g - F_0 > 0 \text{ или } \Delta - 1 > \frac{F_0}{m_0g},$$

т. е., если «избыточная» сила тяжести больше силы сопротивления ее погружению. Очевидно, такой случай не представляет интереса в данном разделе.

Условие начала относительного движения

$$\omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2} \geq 0.$$

После почленного деления первых двух уравнений системы (223) на F_h и третьего уравнения на F_v это условие, учитывая уравнение (220), можно привести к виду

$$\left[\frac{m_0(\Delta - 1)r\omega^2 \sin(\omega t + \alpha)}{F_h} \right]^2 + \left[\frac{m_0(\Delta - 1)r\omega^2 \sin(\omega t + \alpha)}{F_h} \right]^2 + [m_0(\Delta - 1)g]^2 \geq 1.$$

Решим это неравенство

$$|\Delta - 1| > \left[\left(\frac{m_0 r \omega^2}{F_h} \right)^2 + \left(\frac{m_0 g}{F_v} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (224)$$

Как нетрудно убедиться путем непосредственной подстановки при выполнении условий

$$\frac{F_v}{m_0 g} > |\Delta - 1| \geq \left[\left(\frac{m_0 r \omega^2}{F_h} \right)^2 + \left(\frac{m_0 g}{F_v} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (225)$$

система нелинейных уравнений (223) допускает вещественное частное решение вида

$$\omega_{x_0} = r_r \omega \cos(\omega t + \beta); \quad \omega_{y_0} = r_r \omega \sin(\omega t + \beta); \quad (226)$$

$$\omega_{z_0} = \frac{\delta}{\sqrt{1 - \delta^2}} r_r \omega.$$

Здесь

$$r_r = r \left[\frac{m_0}{m_1} (\Delta - 1)^2 - \left(\frac{F_h}{m_1 r \omega^2} \right)^2 (1 - \delta^2) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (227)$$

$$\delta = \frac{m_0(\Delta - 1)g}{F_v}, \quad (228)$$

а фазу β определяют из соотношений

$$\sin(\alpha - \beta) = \frac{r_r}{r} \cdot \frac{m_1}{m_0(\Delta - 1)}; \quad \cos(\alpha - \beta) = \frac{F_h \sqrt{1 - \delta^2}}{m_0(\Delta - 1)r\omega^2}. \quad (229)$$

Полученное решение отвечает движению частицы по винтовой линии с вертикальной осью, радиусом r_r и шагом

$$h = \omega_{z_0} \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{1 - \delta^2}} r_r. \quad (230)$$

Скорость вертикального перемещения частиц, плотность которых отличается от плотности окружающих частиц среды, — это основной показатель интенсивности самосортирования.

Из уравнений (226) и (227)

$$\omega_{z_0} = r\omega \frac{m_0(\Delta - 1)g}{F_v} \left[\left(\frac{m_0(\Delta - 1)}{m_1 \sqrt{1 - \delta^2}} \right)^2 - \left(\frac{F_h}{m_1 r \omega^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (231)$$

Заметим, что полученные результаты справедливы и для случая всплывания частиц с плотностью меньшей, чем плотность частиц среды. В этом случае $\Delta < 1$ и $\omega_{z_0} < 0$.

Анализ формулы (231) позволяет определить зависимость интенсивности самосортирования от различных факторов, характеризующих свойства сыпучей смеси, и условия, необходимые для ее повышения.

Скорость погружения (всплывания) ω_{z_0} увеличивается:

с увеличением Δ , если $\Delta > 1$, и с уменьшением Δ , если $\Delta < 1$;

с уменьшением F_v и F_h ;

с увеличением ускорения $r\omega^2$ и скорости $r\omega$.

Большое влияние на ω_{z_0} оказывает безразмерный параметр δ , показывающий, какую часть от силы сопротивления среды составляет разность сил тяжести частицы и среды в объеме частицы. Из формулы (231) видно, что с приближением δ к единице скорость погружения (всплывания) ω_{z_0} увеличивается.

Представляет интерес с точки зрения интенсификации самосортирования вопрос о влиянии кинематических параметров опорной поверхности, который для наглядности рассмотрим, пренебрегая послынным движением, т. е. применим для сыпучего тела формулу Н. Е. Жуковского (см. главу II).

В этом случае при относительном движении ускорение во всех точках среды одинаково: $r\omega^2 = gf$ и определяется коэффициентом трения f по опорной поверхности.

Тогда, полагая F_v и F_h независимыми от кинематических параметров при относительном движении, перепишем формулу (231) в виде

$$\omega_{z_0} = r\omega c, \text{ где } c = \text{const.}$$

Представляя $r\omega = \frac{gf}{\omega}$, получим

$$\omega_{z_0} = \frac{gf}{\omega} c. \quad (232)$$

Таким образом, для интенсификации процесса самосортирования целесообразно, сохраняя необходимый уровень ускорения опорной поверхности $R\omega^2 > gf$, увеличивать радиус и уменьшать угловую скорость ω .

Не менее важен с практической точки зрения вывод из формулы (232) о пропорциональности скорости ω_{z_0} коэффициенту трения f сыпучего тела по опорной поверхности. При малых значениях f самосортирования может вообще не произойти, если отношение Δ плотностей частицы и среды немного отличается от единицы. Определим предельное значение $\Delta_{пр}$, соответствующее возникновению самосортирования при заданном значении f . Из формулы (231) следует, что для выполнения условия $\omega_{z_0} \neq 0$ необходимо неравенство

$$\left[\frac{m_0(\Delta_{пр} - 1)}{m_1 \sqrt{1 - \delta^2}} \right]^2 - \left(\frac{F_h}{m_1 r \omega^2} \right)^2 > 0.$$

После преобразований и подстановки δ из формулы (228) и $r\omega^2 = gf$ получим

$$|\Delta_{пр} - 1| > \frac{F_h}{m_0 g} \frac{1}{\sqrt{f^2 + \left(\frac{F_h}{F_v}\right)^2}}. \quad (233)$$

Неравенство (233) определяет диапазон плотностей частиц, которые можно извлечь из смеси самосортированием. Этот диапазон увеличивается с увеличением коэффициента трения f сыпучего тела и с увеличением отношения $\frac{F_h}{F_v}$, т. е. с приближением среды к изотропной.

Проанализируем подробнее зависимость скорости погружения (всплывания) частицы от частоты ω и амплитуды r круговых колебаний среды. Из формулы (231) видно, что при достаточно малом ускорении среды

$$r\omega^2 < (r\omega^2)_1 = \frac{F_h \sqrt{1 - \delta^2}}{m_0 |\Delta - 1|} \quad (234)$$

частица не всплывает и не погружается.

Естественно, что критическое ускорение $(r\omega^2)_1$, обусловленное свойствами частицы и среды, должно быть меньше критического ускорения $(r\omega^2)_2 = gf$, которое можно сообщить сыпучему телу в результате трения об опорную поверхность. Увеличение ускорения среды в области $(r\omega^2)_1 < r\omega^2 < (r\omega^2)_2$ вызывает увеличение скорости погружения (всплывания) частицы и при $(r\omega^2)_2$ она достигает максимума

$$\omega_{z_0}^* = \frac{m_0^2 (\Delta - 1) |\Delta - 1| g}{m_1 F_v \sqrt{1 - \delta^2}} r \omega. \quad (235)$$

Значение $\omega_{z_0}^*$ имеет место при начале движения среды относительно опорной поверхности, когда $r = R$. Поэтому уравнение (235) можно переписать в виде

$$\omega_{z_0}^* = \frac{m_0^2 (\Delta - 1) |\Delta - 1| g^2 f}{m_1 F_v \sqrt{1 - \delta^2} \omega} \quad (236)$$

или

$$\omega_{z_0}^* = \frac{m_0^2 (\Delta - 1) |\Delta - 1| g \sqrt{gf}}{m_1 F_v \sqrt{1 - \delta^2}} \sqrt{R}. \quad (237)$$

На рисунке 36, а показаны кривые зависимости ω_{z_0} от ω при различных значениях радиуса R колебаний опорной поверхности, а на рисунке 36, б сопоставлены опытные значения ω_{z_0} с результатами расчета по формуле (231) для случая осаждения минеральных частиц в слое пшеницы ($\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$, $\rho_0 = 1,35 \text{ г/см}^3$, $m_0 = 0,1 \text{ г}$, $m_1 = 0,44 \text{ г}$, $F_h = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$, $F_v = 1,7 \cdot 10^{-2} \text{ Н}$, $f = 1,03$).

В первом приближении можно считать силы сопротивления F_h среды пропорциональными поверхности частицы или площади поперечного сечения, т. е. положить $F_h = C_1 d^2$,

где d — условный размер частицы.

Полагая массу m_0 частицы пропорциональной ее объему, запишем $m_0 g = C_2 d^3$ (C_1 и C_2 — константы). Тогда

$$\frac{F_h}{m_0 g} = \frac{C_1 \cdot 1}{C_2 d} = \frac{C}{d}. \quad (238)$$

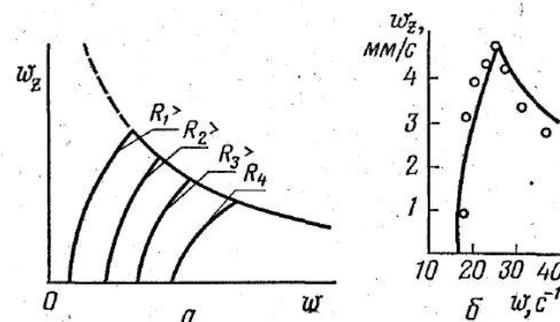


Рис. 36. Кривые зависимости скорости погружения тяжелой частицы от частоты колебаний: а — при различных радиусах колебаний; б — сопоставление опытных и расчетных данных.

Из формулы (238) следует важный для практики сепарирования вывод о том, что процессу самосортирования благоприятствует увеличение среднего размера частиц смеси (частицы обоих компонентов полагаем одинаковыми). Иначе говоря, если предстоит измельчение смеси, то извлекать из нее частицы компонента, отличающегося от остальных равновеликих частиц плотностью, следует до измельчения.

По изложенной методике можно анализировать процесс самосортирования по плотности частиц и для более сложных вариантов модели сыпучего тела, например для двухслойной модели и для послойного движения, используя зависимости, приведенные в главе 2, § 3.

Основные качественные закономерности процесса самосортирования по плотности частиц, полученные для кругового поступательного движения опорной поверхности, можно распространить на случаи прямолинейных колебаний в горизонтальном и вертикальном направлениях.

§ 2. Самосортирование частиц по крупности (размерам)

В сыпучем теле, совершающем послойное движение при круговых колебаниях опорной поверхности, рассмотрим частицу, размеры которой меньше размеров окружающих ее частиц.

При благоприятных условиях рассматриваемая частица может проваливаться через поры, находящиеся между частицами нижележащего слоя продукта.

Вероятность проникновения частицы через поры нижележащего элементарного слоя увеличивается с увеличением интенсивности изменения размеров и формы этих пор, которую можно считать пропорциональной интенсивности послойного движения.

В качестве рабочей гипотезы примем, что скорость вертикального перемещения частицы пропорциональна интенсивности послойного движения в данной точке сыпучего тела

$$w_z = AI, \quad (239)$$

где A — коэффициент, зависящий от формы, размеров и состояния поверхности данной частицы и окружающих ее частиц среды, $\text{г} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$.

При ускорении опорной поверхности больше второго критического интенсивность послойного движения в общем случае определяется по формуле (163).

При постоянной плотности ρ_0 по высоте сыпучего тела положение точки в нем можно определить по следующей безразмерной координате:

$$j = \frac{h}{H} = \frac{G}{G_m},$$

где h — расстояние от верхней границы сыпучего тела; H и G_m — общая толщина сыпучего тела и его давление на опорную поверхность.

При линейной зависимости $f(G)$ интенсивность послойного движения определяют по формуле (173). В этом случае формула (239) принимает вид

$$w_z = \frac{3Agf_0\xi(1+2\xi j)}{G_m\omega\sqrt{2\xi j(1+\xi j)}}. \quad (240)$$

Формула (240) справедлива для любой координаты от $j=0$ до $j=1$ только в том случае, если послойное движение происходит во всем сыпучем теле, т. е. ускорение опорной поверхности больше второго критического (рис. 37). По мере погружения частицы в сыпучее тело ее скорость w_z от $w_z \rightarrow \infty$ в верхнем слое ($j=0$) уменьшается до

$$w_z = \frac{3Agf_0\xi(1+2\xi)}{G_m\omega\sqrt{2\xi(1+\xi)}} \quad (241)$$

в нижнем слое ($j=1$).

Для технологических расчетов особый интерес представляет время t_0 погружения мелкой частицы от верхнего слоя до поверхности сита

$$w_z = \frac{dh}{dt},$$

где $dh = Hdj$,

поэтому

$$dt = H \frac{dj}{w_z(j)}. \quad (242)$$

Подставим $w_z(j)$ из формулы (240)

$$dt = \frac{HG_m\omega}{3Agf_0\xi} \cdot \frac{\sqrt{2\xi j(1+\xi j)}}{1+2\xi j} dj. \quad (243)$$

После интегрирования левой части от 0 до t_0 и правой — от 0 до 1 и, учитывая, что $G_m = \rho gH$, получим

$$t_0 = \frac{\omega H^2 \rho_0}{6\sqrt{2}A} \cdot \frac{1}{f_0 \xi^2} \left(2\sqrt{\xi(1+\xi)} - \arccos \frac{1}{1+2\xi} \right). \quad (244)$$

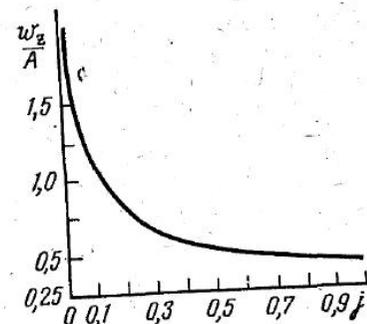


Рис. 37. Кривая зависимости скорости погружения тяжелой частицы от j при $f_0=0,7$ и $\xi=0,2$.

Представим формулу (242) в виде

$$t_0 = C_0 \omega H^2 \rho_0 B_0, \quad (245)$$

где $C_0 = \frac{1}{6\sqrt{2A}}$ — коэффициент, характеризующий сопротивление сыпучего тела погружению мелкой частицы, $\text{г}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-2}$; ρ_0 — средняя плотность сыпучего тела с включением межчастичного пространства, $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$;

$B_0 = \frac{1}{f_0 \xi^2} \left(2\sqrt{\xi(1+\xi)} - \arccos \frac{1}{1+2\xi} \right)$ — безразмерный коэффициент, характеризующий подвижность слоев сыпучего тела.

На рисунке 38 показаны кривые зависимости B_0 от ξ при различных значениях f_0 . Для данного сыпучего тела величина f_0 вполне определена, значение же коэффициента

$$\xi = \frac{l_m - f_0}{f_0} = \frac{l_m}{f_0} - 1$$

зависит от шероховатости опорной поверхности (сита), влияющей на коэффициент сопротивления сдвигу нижнего слоя f_m .

Рис. 38. Кривые зависимости B_0 от ξ при различных значениях f_0 .

Структура формулы (245) указывает пути интенсификации процесса самосортирования, т. е. уменьшения времени осаждения t_0 :

уменьшение частоты колебаний ω в пределах, обеспечивающих послойное движение во всем сыпучем теле, т. е. в области ускорений опорной поверхности, превышающих второе критическое;

уменьшение толщины (высоты) сыпучего тела H , влияющего на t_0 , особенно сильно;

увеличение сопротивления сдвигу нижнего слоя f_m .

Минимальное время осаждения t_0 , которое можно получить при втором критическом ускорении, определяют подстановкой в формулу (245) значения ω_2 из формулы (176)

$$t_{0 \min} = \frac{1}{\sqrt{R}} C_0 H^2 \rho_0 B_0 \sqrt{g f_0^4 \sqrt{1 + 6\xi(1 + \xi)}}, \quad (246)$$

что свидетельствует о целесообразности увеличения радиуса круговых колебаний сита R , если процесс происходит вблизи второго критического ускорения.

Если же $(R\omega^2) > (R\omega^2)_{\text{кр}2}$, то время осаждения не зависит от R , как это видно из формулы (245).

На рисунке 39 показана сплошной линией кривая зависимости $\omega_{z \text{ ср}} = \frac{H}{t_0}$, построенная в закритической области $[(\omega^2 R) > (\omega^2 R)_{\text{кр}2}]$ по результатам табулирования формулы (245). При $R = 25 - 45$ мм, $H = 15$ мм, $n = 107 - 240$ об/мин и $B_0 = 7,39$ нанесены

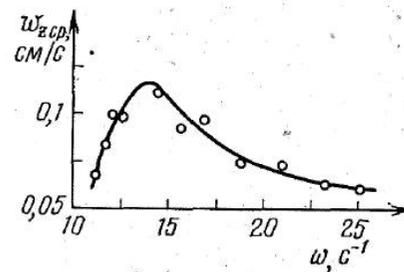


Рис. 39. Кривая зависимости средней скорости погружения мелкой частицы от ω (сплошной линией показан результат расчетов, точками — опытные данные).

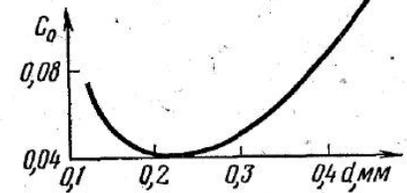


Рис. 40. Кривая зависимости коэффициента сопротивления C_0 от крупности части проходовой фракции d .

точки по экспериментальным данным в соответствующих условиях. В области $(\omega^2 R)_{\text{кр}1} < (\omega^2 R) < (\omega^2 R)_{\text{кр}2}$ рассчитывать по t_0 по формуле (245) нельзя, так как послойное движение теоретически происходит только в верхних слоях.

Однако подвижность частицы в порах сыпучего тела больше подвижности слоев в этой точке, а граница послойного движения практически «размыта», поэтому при послойном движении в верхних слоях мелкая частица проникает, хотя и медленно, через нижележащие. Об этом свидетельствуют экспериментальные точки на рисунке 39. В области $(\omega^2 R) < (\omega^2 R)_{\text{кр}1}$ мелкие частицы не погружаются даже из верхнего слоя.

Очевидно, что коэффициент C_0 , характеризующий сопротивление сыпучего тела погружению мелкой частицы, должен зависеть от соотношения ее размеров с размерами окружающих частиц. Результаты опытов с продуктами измельчения пшеницы (рис. 40 и табл. 12) подтверждают это положение. С уменьшением среднего условного размера $d_{\text{п}}$ проходовой частицы коэффициент C_0 уменьшается до определенного предела, затем вновь увеличивается.

Таблица 12. Влияние размеров и плотности частиц на время их осаждения

Показатели	Сходовая фракция (сыпучее тело) $f_0 = 0,733$; $\xi = 0,235$	Проходовые фракции				
		1	2	3	4	5
Номер сита, проходом сквозь которое получена фракция	100	140	170	210	27	43
Номер сита, сходом с которого получена фракция	120	170	210	27	43	—
Плотность ρ , $\text{г}/\text{см}^3$	0,707	0,723	0,726	0,7	0,68	0,6
Средний условный размер частицы d	0,712	0,47	0,39	0,3	0,2	Меньше 0,12
Среднее время осаждения t_0 , с	—	41,0	27,0	16,6	14,0	25

Примечание: $n = 200$ об/мин, $R = 45$ мм, $H = 25$ мм.

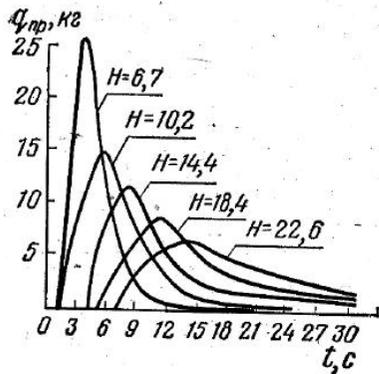


Рис. 41. Кривые зависимости количества проходовой фракции, прошедшей через сыпучее тело, от времени при различной толщине H (мм) этого тела.

Последнее обстоятельство можно объяснить увеличением сопротивления погружению частицы вследствие проявления сил молекулярного и электростатического притяжения, характерных для высокодисперсных частиц. Заметим, что общий характер зависимостей процесса самосортирования при различии частиц только по крупности и только по плотности, рассмотренных в предыдущем параграфе, сохраняется, особенно в отношении влияния кинематических параметров.

В заключение отметим, что при массовом процессе самосортирования существенно проявляются черты стохастичности процесса вследствие

вероятностного характера распределения проходов частиц по размерам и форме, а также случайного характера их взаимодействия с окружающими частицами. Поэтому значения t_0 и C_0 определяют как математическое ожидание соответствующих распределенных величин.

Характерные зависимости количества мелкой фракции, прошедшей через слой сыпучего тела за 1 с, от времени процесса показаны на рисунке 41 для различной толщины сыпучего тела, состоящего из продуктов измельчения пшеницы, со средним размером частиц 0,75 мм при среднем размере мелких частиц 0,35 мм, $n=225$ об/мин и $R=37,5$ мм.

§ 3. Просеивание отдельной частицы

Отклонения по размерам и форме отверстий даже в пределах одного ситового полотна, обусловленные способом образования отверстий и точностью соответствующих машин и инструментов, вносят определенный элемент случайности в процессе просеивания частиц, усугубляемый естественным случайным распределением формы и размеров частиц проходowego компонента.

Учет всех факторов, могущих влиять на процесс просеивания, требует рассмотрения вопроса с последовательным усложнением задачи путем введения дополнительных условий.

Простейшая модель просеивания — это движение отдельной частицы сферической формы с постоянной относительной скоростью над отверстием в горизонтальной поверхности (рис. 42). В начальное мгновение движения над отверстием скорость v_1 центра масс частицы горизонтальна. В начальное мгновение удара о противоположную границу отверстия скорость касательна к траектории, ее

можно разложить на две составляющие: горизонтальную и вертикальную. Если нет сопротивления среды, горизонтальная составляющая остается равной v_1 , а вертикальная вследствие ускоренного падения частицы равна gt ; причем сравнительно с горизонтальной ею можно в первом приближении пренебречь (для реальных условий она составляет менее 0,1 v_1). Пренебрегаем также вращением частицы и изменением тангенциальной составляющей скорости при ударе и оцениваем его как частично упругий, характеризуемый коэффициентом восстановления нормальной составляющей скорости k .

Тогда вектор скорости v_2 после удара частицы образует с нормалью угол отражения β , определяемый из соотношения

$$k = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (247)$$

где α — угол между вектором v_1 и нормалью (угол падения).

В качестве условия прохождения частицы через отверстие примем $\alpha + \beta < 90^\circ$. Тогда частица после удара останется над отверстием и провалится в него, встретив движущиеся за ней частицы, или пройдет над ним в следующий раз с меньшей горизонтальной составляющей скорости; вертикальное же перемещение вверх полагаем ограниченным. Если же $\alpha + \beta > 90^\circ$, частица пройдет над отверстием. Из условий равномерного движения частицы по горизонтали ($x = v_1 t$) и равноускоренного движения по вертикали ($y = \frac{gt^2}{2}$) получаем уравнение траектории

$$y = \frac{gx^2}{2v_1^2}. \quad (248)$$

Из рисунка 42 видно, что

$$\sin \alpha = \frac{\rho - y}{\rho} = 1 - \frac{y}{\rho}; \quad (249)$$

$$\cos \alpha = \frac{B - x}{\rho}. \quad (250)$$

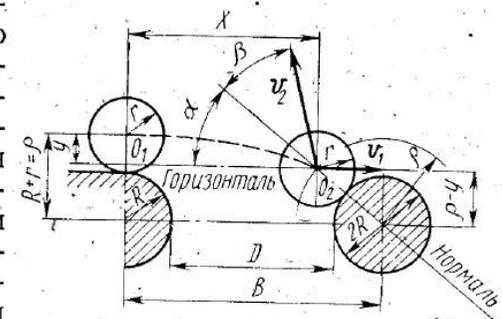


Рис. 42. Область просеивания отдельной сферической частицы через горизонтальное отверстие.

Решая совместно уравнения (248), (249) и (250), получаем

$$v_1 = \sqrt{\frac{gp}{2} \cdot \frac{B - \cos \alpha}{\sqrt{1 - \sin \alpha}}} \quad (251)$$

Назовем критической скоростью v_k такую начальную скорость v_1 , при которой просеивание и непросеивание частицы через данное отверстие равновероятны, что соответствует $\alpha + \beta = 90^\circ$. Тогда $\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta = 1$, а с учетом уравнения (247)

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = k \text{ или } \operatorname{tg} \alpha = \sqrt{k}. \quad (252)$$

Имеем

$$\sin \alpha = \frac{\sqrt{k}}{\sqrt{1+k}} \quad \text{и} \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1+k}}.$$

Из формулы (251) получаем после подстановок и преобразований

$$v_k = \sqrt{\frac{gp}{2} \cdot \frac{B\sqrt{1+k} - 1}{\sqrt{1+k - \sqrt{k(1+k)}}}} \quad (253)$$

При фиксированном значении k с увеличением угла α увеличивается угол β , а следовательно, и их сумма, что уменьшает вероятность просеивания, а согласно уравнению (251) этому случаю соответствует большее значение скорости v_1 .

Обозначая диаметр частицы $d = 2r$, диаметр нити $\delta = 2R$ согласно рисунку 42, получим

$$B = D + \delta \quad \text{и} \quad \rho = \frac{d + \delta}{2}.$$

Представим формулу (253) в следующем виде:

$$v_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{d + \delta} \cdot \frac{2(D + \delta)\sqrt{1+k} - (d + \delta)}{1 + k + \sqrt{k(1+k)}}} \quad (254)$$

Анализ формулы (254) позволяет сделать выводы о влиянии различных факторов на значение критической скорости.

1. При увеличении коэффициента восстановления нормальной скорости от $k = 0$ до $k = 1$ v_k увеличивается

$$\text{от} \quad v_{k=0} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{d + \delta} [2D - (d - \delta)]}$$

$$\text{до} \quad v_{k=1} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{d + \delta} \cdot \frac{2(D + \delta)\sqrt{2} - (d + \delta)}{\sqrt{2 + \sqrt{2}}}}$$

2. Увеличение диаметра нити δ при неизменном размере отверстия D приводит к увеличению v_k , хотя и небольшому.

При просеивании через отверстие с прямоугольными гранями (пробивное сито) $\delta = 0$ и формула (254) принимает вид

$$v_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{d} \cdot \frac{D\sqrt{1+k} - \frac{d}{2}}{\sqrt{1+k} \sqrt{k(1+k)}}} \quad (255)$$

Заметим, что при неупругом ударе ($k = 0$) формула (255) приводится к известной формуле В. П. Горячкина [24], примененной многими исследователями для определения начальной скорости, превышение которой исключает возможность просеивания. Вид этой формулы в наших обозначениях следующий:

$$v \leq \sqrt{\frac{g}{d} \left(D - \frac{d}{2} \right)}. \quad (256)$$

3. При всех прочих неизменных условиях увеличение d и уменьшение D существенно изменяют значение v_k . Как было сказано, значения v_k по формуле (254) определяют условия равновероятности просеивания и непросеивания одной частицы через одно отверстие, т. е. соответствуют вероятности просеивания $P = 0,5$.

При $v_1 < v_k$ вероятность просеивания больше, а при $v_1 > v_k$ меньше, чем 0,5. Эксперименты подтверждают, что даже при соблюдении предельной точности постоянства условий просеивание в определенном диапазоне следует рассматривать как случайное явление, вероятность которого подчинена нормальному распределению Гаусса. Поэтому вероятность просеивания определяют по формуле

$$P = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-\frac{(v-v_k)^2}{2\sigma^2}} dv, \quad (257)$$

где v_k — математическое ожидание, вычисляемое по формуле (254); σ — среднее квадратическое отклонение, определяемое экспериментально и, как установлено, увеличивающееся с увеличением v_k по линейной зависимости.

Результаты расчетов по формулам (254) и (257) хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 43).

Применение изложенной методики анализа процесса просеивания отдельной частицы к случаю движения по наклонным ситам показало, что характер зависимости v_k от размеров и коэффициента k восстановления нормальной составляющей скорости остается таким же, что и для случая горизонтального сита. Однако значения v_k при движении частицы вниз по уклону уменьшаются, а при дви-

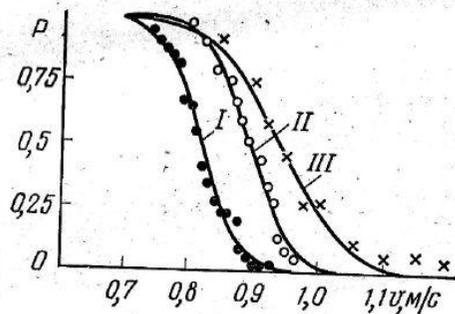


Рис. 43. Кривые зависимости вероятности просеивания отдельной частицы от ее скорости над горизонтальным отверстием (кривые получены расчетом); точками нанесены экспериментальные данные):
I — при $k=0,43$; II — при $k=0,59$; III — при $k=0,66$.

жении вверх — увеличиваются. Это объясняется тем, что в первом случае условие равновероятности просеивания и непросеивания имеет вид $\alpha + \beta = 90^\circ - \alpha_c$, а во втором $\alpha + \beta = 90^\circ + \alpha_c$.

Если частица движется попеременно вверх и вниз с одинаковыми скоростями, то при практически встречающихся $\alpha_c < 17^\circ$ средняя вероятность ее просеивания незначительно отличается от вероятности просеивания при горизонтальном сите.

Некоторые исследователи отмечали зависимость эффекта просеивания в реальных процессах от угла наклона сита к горизонтали, что следует объяснить в

первую очередь изменением других факторов (средней скорости транспортирования, времени обработки и толщины сыпучего тела), а не изменением вероятности просеивания отдельной частицы.

§ 4. Просеивание частицы при движении сыпучего тела

Рассмотрим одно отверстие, над которым без отрыва от поверхности движется сыпучее тело с концентрацией K проходových частиц в нижнем слое (K — количество проходových частиц в нижнем слое в $г/см^2$). Отверстия полагаем прямоугольными с шагом $2a$ в направлении скорости потока и $2b$ — в перпендикулярном направлении, а скорость частиц v — постоянной (рис. 44). За 1 с через сечение $I-I$ над отверстием пройдет количество проходových частиц

$$q_0 = vK2b. \quad (258)$$

Если средняя вероятность просеивания частиц в данное отверстие равна P , то количество прохода за 1 с составляет

$$q_n = P_0 q_0 = 2KbvP_0. \quad (259)$$

Как установлено в предыдущем параграфе, вероятность просеивания P_0 каждой частицы находится в обратной зависимости от скорости v . При $v \rightarrow 0$ вероятность $P_0 \max = 1$ и $q_n \rightarrow 0$, т. е. каждая проходящая над отверстием проходová частица должна просеиваться, но при $v=0$ эти частицы к отверстию не подводятся.

При увеличении v до определенного предела вероятность P_0 остается близкой к единице, и количество прохода q_n увеличивается почти прямо пропорционально v . При дальнейшем увеличении v вероятность P_0 начинает заметно уменьшаться и при $v = v_k$ $P_0 = 0,5$. В этом интервале скоростей количество прохода q_n продолжает увеличиваться, но не пропорционально v , а меньше. В области $v > v_k$ увеличение v сопровождается большим снижением вероятности P_0 , так что произведение $P_0 v$, а следовательно и q_n , достигнув максимума, начинает уменьшаться, причем при $v \rightarrow \infty$ процесс просеивания прекращается. В этом последнем случае над отверстием за 1 с проходит бесконечное количество проходových частиц, но ни одна из них не может просеиваться, так как $P_0 = 0$.

Для определения средней вероятности P_0 просеивания одной проходовой частицы примем, что начальные положения ее центра в сечении $I-I$ на участке протяженностью $2b$ равновероятны. Учтем также, что имеются некоторые участки шириной δ (на рисунке 44 заштрихованы), при движении в которых центра частицы исключена возможность просеивания. Если перемычки Δ между отверстиями имеют в сечении прямые углы (пробивное сито), то

$$\frac{\Delta}{2} < \delta < \frac{\Delta + d}{2},$$

где d — диаметр сферической частицы.

Если перемычки образованы нитями с круглым сечением (плетеные сита), то $0 < \delta < \frac{\Delta}{2}$, так как движение центра частицы с координатой $b - \frac{\Delta}{2} < x < b$ не исключает его перемещения вниз, причем в этом случае реакция перемычки на частицу способствует ее перемещению к середине отверстия.

Итак, просеивание частицы, прошедшей в сечении $I-I$ над участком $2b$, можно рассматривать как сложное событие, состоящее из двух событий: первое заключается в том, что центр частицы будет иметь начальную координату $0 < x < b - \delta$; второе — в том, что при выполнении первого условия частица просеивается. Вероятность первого события не зависит от скорости v

$$P_1 = \frac{b - \delta}{2} = 1 - \frac{\delta}{b}, \quad (260)$$

а вероятность второго определяется по формуле (257).

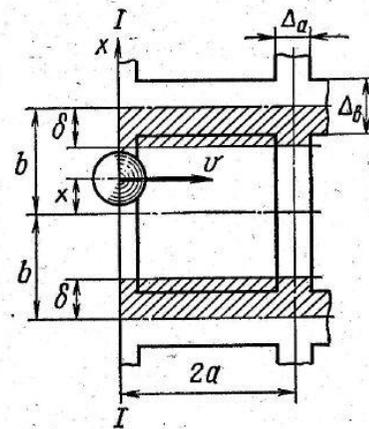


Рис. 44. Схема движения потока частиц над одним отверстием.

Полная вероятность совмещения этих двух событий равна произведению вероятности P_1 на условную вероятность $P_2=P$

$$P_0 = P_1 P_2 = \left(1 - \frac{\delta}{b}\right) [1 - \Phi(v)], \quad (261)$$

где

$$\Phi(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^v e^{-\frac{(v-v_k)^2}{2\sigma^2}} dv. \quad (262)$$

Возвращаясь к определению количества извлекаемого прохода через одно отверстие за 1 с, подставим в формулу (259) выражение P_0 из формулы (261). Получим

$$q_n = 2K(b - \delta)v[1 - \Phi(v)]. \quad (263)$$

Такое количество прохода извлекается каждую секунду через одно отверстие, расположенное на площади сита $4ab$. Поэтому удельная производительность данного участка сита составляет

$$q_y = \frac{q_n}{4ab} = K \frac{(b - \delta)}{2ab} v [1 - \Phi(v)]. \quad (264)$$

Обозначая

$$c = \frac{b - \delta}{2ab} = \frac{1}{2a} \left(1 - \frac{\delta}{b}\right), \quad (265)$$

запишем

$$q_y = cv [1 - \Phi(v)] K. \quad (266)$$

На графике рисунка 45 представлена зависимость $\frac{q_y}{c}$ от v для случая $P_2(v)$, показанного на рисунке 43 (кривая II). Характерно, что оптимальная скорость v_0 , соответствующая максимальному удельному извлечению прохода, меньше критической скорости v_k .

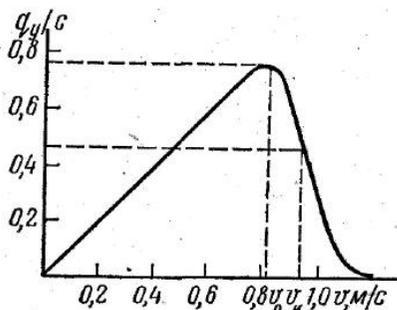


Рис. 45. Кривая зависимости интенсивности просеивания $\frac{q_y}{c}$ от относительной скорости нижнего слоя v .

Из формулы (265) видно, что коэффициент c увеличивается с увеличением шага отверстий по ширине $2b$ и с уменьшением шага отверстий по длине $2a$. Однако на удельное количество прохода в целом уменьшение длины отверстия $D = 2a - \Delta_a$ оказывает противоположное влияние, так как вызывает резкое уменьшение критической скорости v_k и соответствующее уменьшение веро-

ятности просеивания {через множитель $[1 - \Phi(v)]$ }.

Особенно большое влияние на удельное количество извлекаемого прохода q_y оказывает размер частицы d . Во-первых, с уменьшением d существенно увеличивается критическая скорость v_k , что вызывает увеличение вероятности просеивания $P_2 = 1 - \Phi(v)$ и увеличение оптимальной относительной скорости v_0 . Во-вторых, с уменьшением d увеличивается коэффициент c вследствие уменьшения δ . Кроме того, при достаточной длине отверстия $D = 2a - \Delta_a$ может произойти просеивание частицы не только из самого нижнего слоя, но и из расположенного непосредственно над ним. Последнее обстоятельство может быть учтено увеличением коэффициента концентрации K проходовых частиц в нижнем слое.

Таким образом, q_y существенно увеличивается с уменьшением размера частицы.

В реальных сепарируемых смесях размеры проходовых частиц находятся в больших пределах, причем для каждой из них имеется свое значение оптимальной скорости и значение величины q_y . Естественно, что для проходовой фракции в целом зависимость величины q_y от v и более характерна с заметным, но менее четким максимумом.

Просеивание при круговых поступательных колебаниях сита. В отличие от рассмотренного случая просеивания при постоянной по величине и направлению горизонтальной скорости частиц относительно сита при круговых поступательных колебаниях вектор этой скорости непрерывно поворачивается таким образом, что частицы проходят над отверстием в различных направлениях. Примем для рассмотрения следующую упрощенную картину.

1. Ситовая ткань образована нитями формой круглых цилиндров одинакового диаметра Δ . Оси всех нитей расположены в одной горизонтальной плоскости и образуют квадраты, длина сторон которых $2b$ (рис. 46).

2. Форма частиц проходовой фракции — это шар диаметром d . Частицы не отличаются одна от другой массой, состоянием поверхности и другими свойствами.

3. Частицы проходовой фракции, находящиеся в нижнем слое над рассматриваемым участком сита, распределены равномерно по

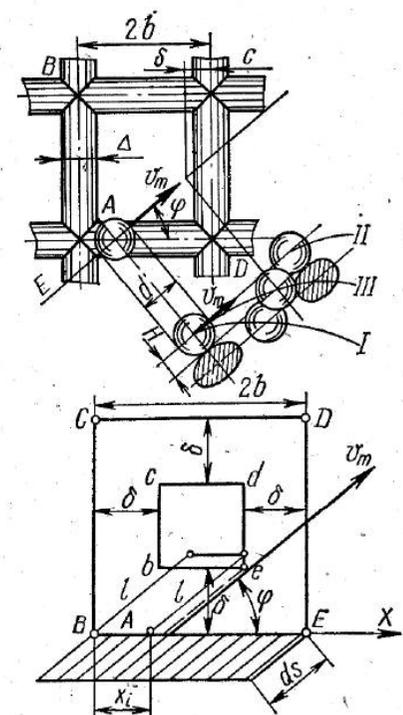


Рис. 46. Схема движения частиц над отверстием сита.

площади сита в количестве K на 1 см^2 , причем при установившемся процессе это количество не зависит от времени.

4. Горизонтальные проекции траекторий центров тяжести всех частиц нижнего слоя в движении относительно сита представляют собой окружности радиуса ρ_m . Ограничивая исследование областью значений ρ_m намного больших размера $2b$, примем, что участок горизонтальной проекции относительной траектории частицы над одним отверстием представляет собой отрезок прямой. Скорость центра тяжести частицы в относительном движении

$$v_m = \omega \rho_m.$$

На рисунке 46 показаны частица, движущаяся над отверстием сита, и три варианта вертикальной проекции ее траектории. Для прохождения через данное отверстие частица должна опуститься на некоторую высоту, не меньшую, чем H , до встречи с противоположной нитью. Этому условию отвечает вариант *I* и не отвечает вариант *II*, вариант *III* — предельный. Для перемещения центра тяжести частицы на высоту H необходимо время T , которое для данных частиц будем считать величиной одинаковой.

Частица просеется через отверстие, если горизонтальная проекция ее центра тяжести, пройдя из начального положения A на стороне квадрата $BCDE$ путь, не меньший $l = v_m T$, окажется на расстоянии δ от одной из трех других сторон этого квадрата.

Определим массу Q_1 частиц, проходящих над отверстием сита через одну из сторон квадрата $BCDE$ при повороте вектора \bar{v}_m от $\varphi = 0$ до $\varphi = \pi$. Как видно из рисунка 46, за время $dt = \frac{d\varphi}{\omega}$ сторону квадрата $BCDE$ пересекут центры тяжести всех проходных частиц, расположенные на площади параллелограмма со сторонами $2b$ и $ds = v_m dt$. Масса этих частиц составит

$$dQ_1 = K2bd s \sin \varphi$$

или

$$dQ_1 = \frac{v_m}{\omega} 2Kb \sin \varphi d\varphi;$$

тогда

$$Q_1 = 2Kb \frac{v_m}{\omega} \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi = 4Kb \frac{v_m}{\omega}. \quad (267)$$

При этом через данное отверстие просеется количество проходной фракции

$$q_1 = Q_1 P,$$

где P — полная вероятность просеивания каждой из этих частиц при однократном движении над одним отверстием.

$$q_1 = 4Kb \frac{v_m}{\omega} P.$$

Учитывая, что число сторон всех отверстий на 1 см^2 площади сита составляет $\frac{1}{b^2}$ и что число оборотов вектора \bar{v}_m за 1 с равно $\frac{\omega}{2\pi}$, получаем количество прохода, извлеченное за 1 с на 1 см^2 площади сита

$$q = \frac{1}{b^2} \cdot \frac{\omega}{2\pi} q_1 = \frac{2}{\pi} K \frac{v_m}{b} P.$$

Так как $v_m = \frac{l}{T}$, то это соотношение представим в следующем

$$\text{виде:} \quad q = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{K}{T} \cdot \frac{l}{b} P = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{K}{T} \nu P, \quad (268)$$

где $\nu = \frac{l}{b}$.

Полную вероятность просеивания одной частицы P при однократном движении над одним отверстием рассмотрим как сумму элементарных вероятностей совмещения двух событий. Первое событие заключается в том, что частица пройдет над отверстием в направлении, образующем с осью X (см. рис. 46) угол от φ до $\varphi + d\varphi$.

Вероятность P_φ этого события определим как отношение количества частиц проходной фракции dQ_1 , прошедших в заданном направлении, к общему количеству Q_1 частиц этой фракции, центры тяжести которых пересекли сторону BE при изменении угла φ от 0 до π

$$P_\varphi = \frac{dQ_1}{Q_1} = \frac{1}{2} \sin \varphi d\varphi. \quad (269)$$

Второе событие заключается в том, что исходное положение A частицы на стороне $BE = 2b$ благоприятствует ее просеиванию при движении в заданном направлении.

Если таким благоприятным положениям точки A на стороне BE соответствует отрезок протяженностью x_i , то условную вероятность второго события (при условии выполнения первого) найдем из соотношения

$$P_x = \frac{x_i}{2b}. \quad (270)$$

Вероятность совмещения двух событий

$$dP = P_x P_\varphi = \frac{1}{4b} x_i \sin \varphi d\varphi.$$

$$P = \frac{1}{4b} \int_0^x x_i \sin \varphi d\varphi. \quad (271)$$

Длина отрезка x_i зависит от угла φ , причем характер этой зависимости различен при разных соотношениях размеров b , l и δ . Вводя безразмерный коэффициент $\varepsilon = \frac{\delta}{b}$, все возможные случаи соотношений этих размеров можно привести к четырем областям значений $v = \frac{l}{b}$ (табл. 13).

Таблица 13. Области значений v и формулы для подсчета полной вероятности просеивания P частицы при движении над одним отверстием

Область значений	Вероятность просеивания P	vP
$0 < v \leq \varepsilon$	$P = \frac{1 - \varepsilon}{2 - \varepsilon}$	$vP = \frac{(1 - \varepsilon)v}{(2 - \varepsilon)v}$
$\varepsilon \leq v \leq 2 - \varepsilon$	$P = \frac{1}{4} \left(v + \frac{\varepsilon^2}{v} \right)$	$vP = \frac{v^2 + \varepsilon^2}{4}$
$2 - \varepsilon \leq v \leq \sqrt{(2 - \varepsilon)^2 + \varepsilon^2}$	$P = \frac{1 - \varepsilon}{v} \times$	$vP = (1 - \varepsilon) \left[1 - \sqrt{v^2 - (2 - \varepsilon)^2} \right]$
$\sqrt{(2 - \varepsilon)^2 + \varepsilon^2} \leq v \leq \sqrt{2(2 - \varepsilon)}$	$P = \frac{v}{4} \frac{1 - \varepsilon}{2v} \times$	$vP = \frac{v^2}{4} \frac{(2 - \varepsilon)}{2} \times$
	$\times \sqrt{v^2 - (2 - \varepsilon)^2}$	$\times \sqrt{v^2 - (2 - \varepsilon)^2}$

Пример. Методика определения вероятности P для области, которой соответствует

$$\varepsilon \leq v \leq 2 - \varepsilon \text{ или } \delta \leq l \leq 2b - \delta.$$

Вследствие полной симметрии условий достаточно рассмотреть изменение угла φ от 0 до $\frac{\pi}{2}$. Различаем четыре зоны, каждой из которых соответствует определенный характер зависимости x_i от φ ; (рис. 47).

Первая зона:

$$0 \leq \varphi \leq \varphi_1,$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{\delta}{2b - \delta}.$$

В этой зоне просеивание частицы невозможно при любом начальном расположении ее центра тяжести на стороне BE , так как горизонтальная траектория центра тяжести не пересекает квадрата $bcde$. Следовательно,

$$x_{0-1} = 0; P_{x_1} = 0. \quad (272)$$

Вторая зона:

$$\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2,$$

$$\text{где } \varphi_2 = \arcsin \frac{\delta}{l}.$$

Пусть горизонтальная проекция относительной скорости частицы образует с осью X угол φ_{1-2} , причем $\varphi_1 \leq \varphi_{1-2} \leq \varphi_2$.

Тогда просеиванию частицы благоприятствует начальное расположение ее центра тяжести на участке x_{1-2} оси X . Если начальное положение центра тяжести частицы находится за пределами этого участка, то его траектория в относительном движении не пересекает квадрата $bcde$. Если же центр тяжести частицы в начальное мгновение был расположен внутри отрезка x_{1-2} , то его траектория в относительном движении пересекает квадрат $bcde$. При этом центр тяжести пересечет сторону bc , пройдя от начального положения путь $S > l$ за время $t > T$. Следовательно, за это время центр тяжести опустится в отверстие на высоту, большую, чем H , что достаточно для просеивания частицы

$$x_{1-2} = (2b - \delta) - \delta \operatorname{ctg} \varphi_{1-2}.$$

Следовательно,

$$P_{x_2} = \frac{x_{1-2}}{2b} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{\varepsilon}{2} \operatorname{ctg} \varphi_{1-2} \quad (273)$$

Третья зона:

$$-\varphi_2 \leq \varphi \leq \varphi_3,$$

$$\text{где } \varphi_3 = \frac{\pi}{2} - \varphi_1,$$

Пусть горизонтальная проекция относительной скорости центра тяжести частицы образует с осью X угол φ_{2-3} , причем $\varphi_2 \leq \varphi_{2-3} \leq \varphi_3$. Просеиванию частицы благоприятствует начальное расположение ее центра тяжести на участке x_{2-3} . Если начальное положение центра тяжести частицы будет за пределами участка x_{2-3} , то частица не просеется или потому, что траектория ее центра тяжести не пересечет квадрат $bcde$, или потому, что, пройдя путь l , центр тяжести окажется за пределами этого квадрата. При начальном расположении в пределах отрезка x_{2-3} траектория центра тяжести пересечет квадрат $bcde$. При этом траектория центра тяжести пересечет сторону bc или сторону bc .

В обоих случаях проекция центра тяжести, пройдя от начального положения путь l или больший, будет находиться внутри квадрата, что обеспечивает условия, достаточные для просеивания частицы

$$x_{2-3} = (2b - \delta) - l \cos \varphi_{2-3}. \quad (274)$$

Следовательно,

$$P_{x_3} = \frac{x_{2-3}}{2b} = \left(1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) - \frac{v}{2} \cos \varphi_{2-3}.$$

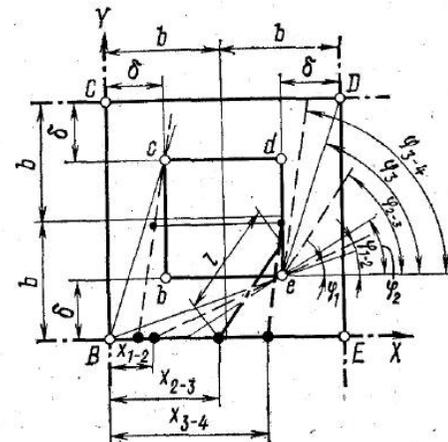


Рис. 47. Схема для определения вероятности просеивания при движении частицы над отверстиями сита.

Четвертая зона: $\varphi_3 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ или $\frac{\pi}{2} \rightarrow \varphi_1 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$.

Пусть горизонтальная проекция скорости центра тяжести частицы в движении относительно сита образует с осью X угол φ_{3-4} , причем

$$\varphi_3 \leq \varphi_{3-4} \leq \frac{\pi}{2}.$$

Просеиванию частицы благоприятствует начальное расположение ее центра тяжести на участке x_{3-4} . Если в начальное мгновение центр тяжести расположен за пределами участка x_{3-4} , то траектория не пересекает квадрата $bcde$ или проекция центра тяжести, пройдя путь l , оказывается за пределами этого квадрата.

Оба эти случая не способствуют просеиванию частицы. При начальном расположении в пределах x_{3-4} траектория центра тяжести пересекает квадрат $bcde$. При этом проекция центра тяжести, пройдя путь l или больший, будет расположена внутри этого квадрата, что достаточно для просеивания частицы

$$x_{3-4} = 2(b - \delta) - l \cos \varphi_{3-4} + (2b - \delta) \operatorname{ctg} \varphi_{3-4}.$$

Следовательно,

$$P_{x_4} = \frac{x_{3-4}}{2b} = (1 - \varepsilon) - \frac{v}{2} \cos \varphi_{3-4} + \left(1 - \frac{\varepsilon}{2}\right) \operatorname{ctg} \varphi_{3-4}. \quad (275)$$

Полная вероятность просеивания одной частицы через данное отверстие будет равна сумме четырех интегралов

$$P_{11} = \int_0^{\varphi_1} P_{x_1} \sin \varphi_{0-1} d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} P_{x_2} \sin x_{1-2} d\varphi + \int_{\varphi_2}^{\frac{\pi}{2} - \varphi_1} P_{x_3} \sin \varphi_{2-3} d\varphi + \int_{\frac{\pi}{2} - \varphi_1}^{\frac{\pi}{2}} P_{x_4} \sin \varphi_{3-4} d\varphi.$$

Подставив вместо P_{x_1} , P_{x_2} , P_{x_3} , P_{x_4} их значения из уравнений (272), (273), (274), (275), после интегрирования и приведения подобных членов получим

$$P_{11} = \frac{2 - \varepsilon}{2} - \frac{\varepsilon}{2} \sin \varphi_2 - \frac{v}{8} (1 + \cos 2\varphi_2). \quad (276)$$

Так как

$$\sin \varphi_2 = \frac{\delta}{l} = \frac{\varepsilon}{v}$$

и

$$\cos 2\varphi_2 = 1 - 2 \sin^2 \varphi_2 = 1 - 2 \left(\frac{\varepsilon}{v}\right)^2,$$

то после подстановок и элементарных преобразований получаем окончательно

$$P_{11} = \frac{2 - \varepsilon}{2} - \frac{1}{4} \left(v + \frac{\varepsilon^2}{v}\right). \quad (277)$$

Аналогично получены зависимости P , а следовательно, и vP от ε и v для остальных областей.

На рисунке 48 приведены зависимости vP от v , построенные для различных значений ε , причем согласно формуле (268) удельные количества извлеченного прохода можно считать пропорциональными vP . Анализ полученных зависимостей дает возможность сделать следующие выводы:

увеличение ε при неизменных значениях v во всех областях приводит к уменьшению P и vP ;

увеличение v при неизменных значениях ε во всех областях, кроме первой, ведет к уменьшению вероятности P (в первой области значение P не зависит от v);

увеличение v в первой и второй областях вызывает увеличение vP , а в третьей и четвертой — уменьшение;

максимальное значение $(vP)_{\max} = 1 - \varepsilon$ будет на границе второй и третьей областей, т. е. при $v = 2 - \varepsilon$.

Последнее обстоятельство представляет особый интерес, так как свидетельствует о кинематических параметрах, обеспечивающих наиболее эффективное просеивание для заданной проходовой фракции через заданное сито. Тогда максимальное количество прохода за 1 с через 1 см² сита (q_{\max} , г/см²·с) определим из соотношения (268)

$$q_{\max} = \frac{2K}{\pi T} (1 - \varepsilon). \quad (278)$$

Соответствующую этому режиму относительную скорость нижнего слоя определяем из формулы

$$v_{m_0} = \frac{b}{T} (2 - \varepsilon). \quad (279)$$

При применении сделанных выводов к реальным продуктам и процессам необходимо учитывать вероятностный характер распределения размеров и формы частицы проходовой фракции и отличие формы отверстий от правильных квадратов.

Эти обстоятельства заставляют считать точки на кривых $vP(v)$ как центры распределения этих случайных величин. Экспериментальные кривые более плавные, экстремум у них выражен менее четко, чем у расчетных.

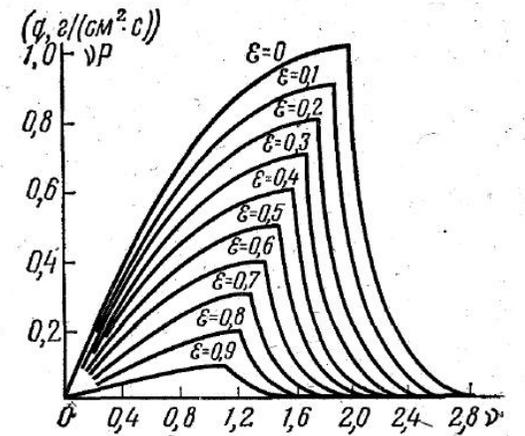


Рис. 48. Кривые зависимости vP от v .

Как видно из данных таблицы 14, при уменьшении q_{\max} в 7 раз значения K и T изменяются незначительно, отклоняясь от среднего значения не более чем на 17%, что не выходит за пределы точности их определения.

Таблица 14. Результаты просеивания продуктов измельчения пшеницы со средним размером $d=0,35$ мм

Номер сита	$b_{\text{ср}}$, мм	$\Delta_{\text{ср}}$, мм	δ , мм	ϵ	v_{m_0} , мм/с	q_{\max} , г/см ² .с	$10^3 K$, г/см ²	$10^4 T$
130	0,376	0,200	0,275	0,733	980	0,324	1,84	4,90
150	0,334	0,190	0,270	0,808	760	0,208	1,78	5,25
170	0,301	0,180	0,265	0,880	620	0,097	1,40	5,40
180	0,272	0,175	0,262	0,963	600	0,046	1,80	4,90

Для определения оптимальных параметров процесса большой интерес представляет вопрос о влиянии толщины сыпучего тела на интенсивность просеивания проходовой фракции из нижнего слоя продукта.

Частицы нижнего слоя в результате ударов о нити ситовой ткани отражаются вверх и, если нет вышележащих слоев, отрываются от поверхности сита, уменьшая концентрацию проходových частиц в нижнем слое. Частицы вышележащих слоев, непосредственно не касающиеся сита, ограничивают это движение частиц нижнего слоя продукта.

Поэтому при увеличении массы вышележащих слоев количество прохода возрастает. При некоторой критической толщине сыпучего тела обеспечивается непрерывный контакт частиц нижнего слоя с поверхностью сита и интенсивность просеивания достигает максимума.

Дальнейшее возрастание толщины сыпучего тела увеличивает боковое давление на частицы нижнего слоя и в результате трения уменьшает их подвижность при прохождении в отверстия сита. Этот эффект [7] хорошо согласуется с результатами эксперимента. С увеличением размеров и массы проходových частиц оптимальная толщина сыпучего тела возрастает. К этому же приводит и увеличение скорости нижнего слоя относительно сита, так как все эти факторы увеличивают кинетическую энергию подбрасываемых частиц.

Просеивание при прямолинейных колебаниях сита. В этом случае вектор относительной скорости частицы не изменяет линии действия, как при круговых колебаниях, изменяются только его модуль и направление. Таким образом, значения начальной скорости частицы относительно отверстия в различные моменты одного периода колебаний неодинаковы. Им соответствует разная вероятность просеивания и различное мгновенное удельное количество

прохода. Среднее удельное количество прохода за период можно определить по изложенной выше методике с учетом зависимости $v(t)$ по соответствующим уравнениям (61), (64) теории вибрационного перемещения. При наклоне поверхности сита к горизонтали необходимо учитывать также различные значения критической скорости при движении частицы вверх и вниз.

В лучшем случае действительные значения относительной скорости совпадают с оптимальными лишь 4 раза за период (дважды при перемещении в одном направлении), в остальное время действительные скорости в большей или меньшей степени удалены от оптимальных. Поэтому среднее удельное количество прохода оказывается меньшим, чем при круговых колебаниях, когда действительная скорость частицы может быть все время близка к оптимальной.

Эти соображения позволяют утверждать, что для сферических частиц при безотрывном движении по поверхности сита круговые поступательные движения обеспечивают большую эффективность просеивания, чем прямолинейные.

Если же форма проходových частиц удлиненная, то более эффективными могут быть прямолинейные колебания, обеспечивающие определенную ориентацию частицы относительно отверстия.

Относительное движение частиц с подбрасыванием оказывается эффективнее безотрывного движения для плоских частиц при разделении по толщине и для сильно удлиненных при разделении по ширине.

§ 5. Эффективность ситового сепарирования

Явления самосортирования и просеивания были рассмотрены независимо и происходящими на элементарном участке сита, что позволяло пренебрегать изменением условий процесса по протяженности этого участка.

Теперь представим, что вновь поступившая на приемном конце ситового канала порция продукта образовала над единицей площади сита столбик высотой H_0 , в котором проходовая фракция равномерно распределена с объемной концентрацией K_{0v} (г/см³), причем концентрация в нижнем слое составляла $K_0 = K_{0v} \Delta h_H$ (г/см²). С момента $t=0$ проходовые частицы вследствие самосортирования начали опускаться в нижний слой со скоростью ω_z , которую примем постоянной по всей высоте столбика. Количество проходových частиц, поступающих в нижний слой за 1 с, составляет

$$q_c = K_{0v} \omega_z = \frac{K_0}{\Delta h_H} \omega_z. \quad (280)$$

В то же время из нижнего слоя высеиваются проходовые частицы с интенсивностью q_y (г/см².с), которую для всех случаев отно-

сительного движения нижнего слоя в общем виде можно представить формулой

$$q_y = C_y K, \quad (281)$$

где $C_y = cv[1 - \Phi(v)]$, причем c можно определить по формуле (265); K — текущее значение концентрации проходových частиц в нижнем слое.

Самосортирование и просеивание происходят в движущемся столбике, который вместе со всем продуктом вследствие подачи равномерно перемещается к сходовому концу канала со скоростью v .

В мгновение t концентрация частиц проходовой фракции составит

$$K = K_0 + q_c t - Q_{\Pi}. \quad (282)$$

Второе слагаемое правой части определяет количество проходových частиц, поступивших в нижний слой в результате самосортирования, а последнее — количество этих частиц, извлеченное проходом за время t .

Так как $q_y = \frac{dQ_{\Pi}}{dt}$, то вид дифференциального уравнения ситового сепарирования будет следующим:

$$\frac{dQ_{\Pi}}{dt} = C_y(K_0 + q_c t - Q_{\Pi}). \quad (283)$$

Дифференцируя выражение в скобках по времени, получим

$$\frac{dK}{dt} = q_c - \frac{dQ_{\Pi}}{dt}, \text{ откуда } \frac{dQ_{\Pi}}{dt} = q_c - \frac{dK}{dt}.$$

Подставляем полученное выражение в уравнение (283)

$$q_c - \frac{dK}{dt} = C_y K$$

или

$$\frac{dK}{\frac{q_c}{C_y} - K} = C_y dt. \quad (284)$$

Интегрируя уравнение (284) в пределах от K_0 до K и от 0 до t , получим выражение для концентрации K

$$K = \frac{q_c}{C_y} + \left(K_0 - \frac{q_c}{C_y}\right) e^{-C_y t}. \quad (285)$$

Из формулы (282) определяем Q_{Π}

$$Q_{\Pi} = q_c t + \left(K_0 - \frac{q_c}{C_y}\right) (1 - e^{-C_y t}), \quad (286)$$

а из формул (281) и (285) — интенсивность извлечения проходовой фракции

$$q_y = q_c + C_y \left(K_0 - \frac{q_c}{C_y}\right) e^{-C_y t}. \quad (287)$$

Пользуясь полученными формулами, необходимо помнить о том, во-первых, что эти формулы справедливы только для времени $0 < t < t_0$, т. е. до тех пор, пока не закончится процесс самосортирования (t_0 — время погружения частицы до поверхности сита), и, во-вторых, что предельное значение концентрации проходových частиц в нижнем слое K' может быть достигнуто за время $t' < t_0$. Зная значения постоянных q_c , C_y , K_0 , t_0 , K' , расчет проводим в следующем порядке.

Определяем из формулы (285) значение t' , соответствующее предельной концентрации K'

$$t' = \frac{1}{C_y} \ln \frac{K_0 - \frac{q_c}{C_y}}{K' - \frac{q_c}{C_y}}. \quad (288)$$

Если окажется, что $t' > t_0$, то это значит, что самосортирование закончится раньше, чем будет достигнута предельная концентрация проходových частиц в нижнем слое, и формулами (285), (286) и (287) можно пользоваться в области $0 \leq t \leq t_0$. Тогда наибольшая концентрация K_0 будет в начальный момент, если $K_0 > \frac{q_c}{C_y}$. Если же

$K_0 \leq \frac{q_c}{C_y}$, то максимальная концентрация будет при t_0

$$K_{t_0} = \frac{q_c}{C_y} - \left(\frac{q_c}{C_y} - K_0\right) e^{-C_y t_0}. \quad (289)$$

В обоих случаях при $t > t_0$ происходит только просеивание при убывающей концентрации, и формулы для определения K , Q_{Π} , q_y принимают вид

$$K = K_{t_0} e^{-C_y t}; \quad (290)$$

$$Q_{\Pi} = K_{t_0} (1 - e^{-C_y t}); \quad (291)$$

$$q_y = C_y K_{t_0} e^{-C_y t}. \quad (292)$$

Пример. Определить коэффициент извлечения мелких примесей на промышленных ситах сепаратора ЗСШ-20 и производительность сепаратора при следующих условиях:

$H_0 = 2$ см — начальная толщина слоя исходной смеси;
 $\Delta h = 0,4$ см — толщина нижнего слоя;

$Q_0 = 1,2 \text{ г/см}^2$ — начальное количество исходной смеси;
 $Q_{п_0} = 0,05 \text{ г/см}^2$ — начальное количество мелких примесей, что соответствует

$$\text{засоренности } \frac{Q_{п_0}}{Q_0} \cdot 100\% = \frac{0,05}{1,2} \cdot 100\% \approx 4,2\%;$$

$\omega_z = 0,2 \text{ см/с}$ — средняя скорость погружения мелких примесей;
 $C_y = 0,8 \text{ с}^{-1}$ — коэффициент интенсивности просеивания;
 $L = 0,75 \text{ м}$ — длина ситовой части канала;
 $v_{ср} = 7,5 \text{ см/с}$ — средняя скорость транспортирования; $K'_H = 0,1 \text{ г/см}^2$.

Решение. Начальная концентрация примесей в смеси

$$K_{v_0} = \frac{Q_{п_0}}{H} = \frac{0,05}{2,0} = 0,025 \text{ г/см}^3.$$

Начальная концентрация примесей в нижнем слое

$$K_{H_0} = K_{v_0} \Delta h = 0,025 \cdot 0,4 = 0,01 \text{ г/см}^2 \quad \text{при } K_{H_0} < K'_H.$$

Время погружения примесей от верхнего до нижнего слоя

$$t_1 = \frac{H_0 - \Delta h}{\omega_z} = \frac{2 - 0,4}{0,2} = 8 \text{ с.}$$

Интенсивность поступления примесей в нижний слой

$$q_c = K_{v_0} \omega_z = 0,025 \cdot 0,2 = 0,05 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с.}$$

Начальная интенсивность просеивания

$$q_{y_0} = C_y K_{H_0} = 0,8 \cdot 0,01 = 0,008 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с} \quad \text{при } q_{y_0} > q_c.$$

Интенсивность просеивания и концентрация примесей в нижнем слое при $t_1 = 8 \text{ с}$

$$q_{y_8} = q_c + (q_{y_0} - q_c) e^{-C_y t} = 0,005 + (0,008 - 0,05) e^{-0,8 \cdot 8} \approx 0,05 \text{ г/см}^2 \cdot \text{с};$$

$$K_{H_8} = \frac{q_{y_8}}{C_y} = \frac{0,005}{0,8} = 0,00625 \text{ г/см}^2.$$

Количество примесей, извлеченное за $t_1 = 8 \text{ с}$

$$Q_{п_1} = q_c t_1 + \left(K_{H_0} - \frac{q_c}{C_y} \right) (1 - e^{-C_y t_1}) = 0,005 \cdot 8 + \left(0,01 - \frac{0,005}{0,8} \right) \cdot (1 - e^{-0,8 \cdot 8}) \approx 0,0437 \text{ г/см}^2.$$

Время обработки порции продукта в ситовом канале

$$t_L = \frac{L}{v_{ср}} = \frac{75}{7,5} = 10 \text{ с.}$$

Время просеивания после окончания самосортирования

$$t_2 = t_L - t_1 = 10 - 8 = 2 \text{ с.}$$

Количество примесей, извлеченное за время t_2

$$Q_{п_2} = K_{H_8} (1 - e^{-C_y t_2}) = 0,00625 (1 - e^{-0,8 \cdot 2}) \approx 0,005 \text{ г/см}^2.$$

Общее количество извлеченных примесей и коэффициент извлечения

$$Q_{п} = Q_{п_1} + Q_{п_2} = 0,0437 + 0,005 = 0,0487 \text{ г/см}^2;$$

$$\eta = \frac{Q_{п}}{Q_{п_0}} \cdot 100\% = \frac{0,0487}{0,05} \cdot 100\% = 97,4\%.$$

Производительность каждого ситового канала (ширина $B = 36 \text{ см}$)

$$Q_1 = Q_0 B v_{ср} = 1,2 \cdot 36 \cdot 7,5 = 325 \text{ г/с} = 0,325 \text{ кг/с.}$$

Производительность сепаратора при 16 приемных каналах

$$Q = 16 \cdot 0,325 \cdot \frac{3600}{1000} = 18,8 \text{ т/ч.}$$

Глава 4. ВИБРОПНЕВМАТИЧЕСКОЕ СЕПАРИРОВАНИЕ

Явления, происходящие в аэрируемом потоке зерновой смеси на вибрирующей шероховатой поверхности деки, совершающей поступательно-возвратные колебания, очень сложны. Объяснить это можно многочисленными связями движущихся частиц, взаимодействующих друг с другом, с воздушным потоком и с поверхностями, ограничивающими поток.

Целесообразно представить исследуемый процесс в упрощенном виде [47, 48], условно разделив его на несколько стадий, и в каждой из них выделить для рассмотрения явления, оказывающие решающее влияние на интересующие нас конечные результаты процесса или на условия протекания последующих стадий. В то же время каждую отдельную стадию процесса приходится схематизировать, чтобы математически описать модель и влияние методики ее экспериментальной проверки.

Наблюдения за работой машин фирмы Кипп-Келли, БМК-15 и анализ опытных данных позволили представить процесс извлечения тяжелой (минеральной) частицы из аэрируемой зерновой массы в машинах с наклонными гармоническими колебаниями в плоскости наибольшего ската деки, состоящий из двух основных стадий (рис. 49).

На первой стадии тяжелая частица, поступившая в очередной порции зерновой смеси сверху на слой движущейся сыпучей среды,

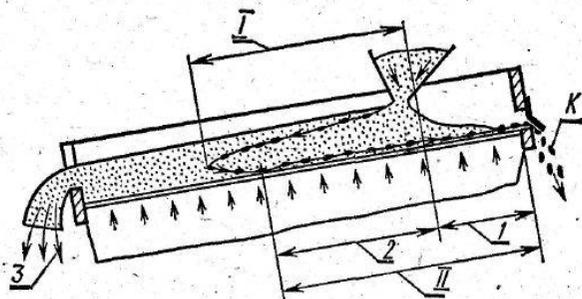


Рис. 49. Схема процесса вибропневматического сепарирования:

I — первая стадия; *II* — вторая стадия; *1* — верхняя зона; *2* — нижняя зона; *К* — камни; *З* — зерно.

перемещается вместе с ним вдоль деки, одновременно вследствие погружения приближаясь к ее поверхности.

Проекция средней скорости тяжелой частицы на плоскость деки практически не отличается от проекций средней скорости соответствующих точек окружающей ее среды до момента соприкосновения тяжелой частицы с декой. На результаты всего процесса сепарирования существенно влияет расстояние, которое пройдет тяжелая частица (камень) вдоль деки до соприкосновения с ней. Это расстояние зависит как от скорости слоев зернового потока, так и от скорости погружения в него тяжелой частицы.

На второй стадии тяжелая частица движется по поверхности деки вверх навстречу основному зерновому потоку до тех пор, пока не выйдет через верхнее выпускное отверстие. При этом тяжелая частица проходит две зоны, общая граница которых — это место поступления на деку исходной зерновой смеси. Первоначально тяжелая частица движется в нижней зоне, где сыпучее тело сохраняет примерно одинаковую толщину, намного большую, чем размеры частицы. Движение в этой зоне нужно рассматривать с учетом взаимодействия тяжелой частицы с окружающими зернами основного потока.

Последующее движение частицы в верхней зоне (выше места подачи) происходит в несколько иных условиях вследствие уменьшения толщины сыпучего тела. При правильной наладке процесса частицы легкой фракции не должны достигать верхнего выходного отверстия, это позволяет исключить из теоретического рассмотрения их действие на тяжелую частицу.

Основное условие нормального протекания процесса — это перемещение тяжелой частицы без подбрасывания (без отрыва от поверхности деки). Это особенно важно для нижней зоны второй стадии, где подбрасывание тяжелой частицы сопровождается возвращением ее в верхние слои зернового потока, что создает опасность выхода ее с деки вместе с очищенным зерном.

Первая стадия процесса зависит в основном от правильно выбранной длины рабочего канала. Как установлено опытами, погружение тяжелых частиц в аэрируемом вибрирующем сыпучем слое происходит в значительно большей области изменения основных параметров процесса, чем при их перемещении вверх по деке. Вследствие этого эффективное протекание второй стадии возможно только в относительно узком диапазоне изменения параметров процесса, а практическая настройка машины на оптимальный режим требует учета нескольких одновременно действующих факторов.

Изложенное позволяет считать, что рассмотрение условий вибрационного перемещения частиц в аэрируемом потоке зерновой смеси — это основная задача как теоретического, так и экспериментального исследования.

Основные результаты теоретического и экспериментального исследования процесса [47] в сокращенном виде с некоторыми упрощениями представим, используя метод определения средней скорости частицы материала без подбрасывания, изложенный в главе 2.

В рассматриваемом случае для частицы на поверхности деки необходимо учесть дополнительно реакцию P_B восходящего воздушного потока, направленную по нормали к опорной поверхности.

При этом дифференциальные уравнения относительного движения частицы в обозначениях величин, принятых в главе 2, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - mg \sin \alpha - fN; \\ m\ddot{y} &= mA\omega^2 \sin \beta \sin \omega t - mg \cos \alpha + N + P_B. \end{aligned} \right\} \quad (293)$$

Так же как в главе 2, эта система приводится к виду

$$\ddot{x}_{\pm} = a_{\pm}(\sin \delta - z_{\pm}), \quad (294)$$

причем $a_{\pm} = A\omega^2 \frac{\cos(\beta \mp \rho)}{\cos \beta}$, что совпадает с формулой (25), а

$$z_{\pm} = \frac{g}{A\omega^2} \cdot \frac{[\sin(\alpha \pm \rho) \mp p \sin \rho]}{\cos(\beta \mp \rho)}, \quad (295)$$

Величину p определяем по формуле

$$p = \frac{P_B}{mg}. \quad (296)$$

Здесь, так же как и в главе 2, верхние индексы у a и z и верхние знаки в правой части относятся к положительному направлению относительной скорости (движение вверх), а нижние — к отрицательному направлению (движение вниз).

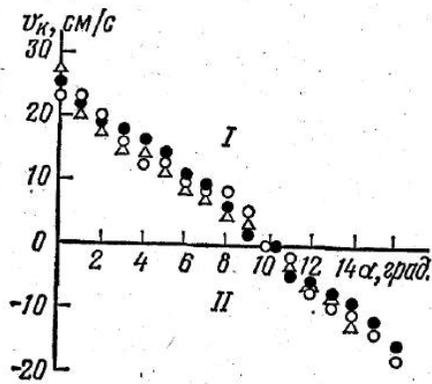


Рис. 50. Зависимость средней скорости тяжелой частицы по деке от угла α при скорости воздушного потока ($n=650$ об/мин):
 $\circ - v_a=0$; $\bullet - v_a=1,4$ м/с; $\triangle - v_a=2,4$ м/с; I — движение частицы вверх; II — движение частицы вниз.

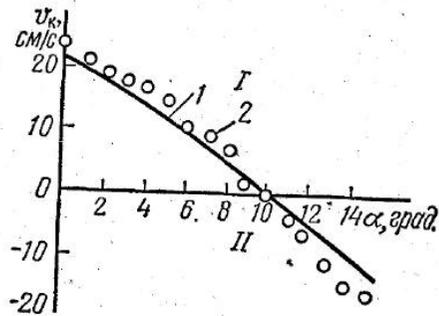


Рис. 51. Сопоставление расчетных (1) и экспериментальных (2) данных ($v_a=0$; $n=650$ об/мин):
 I — движение частицы вверх; II — движение частицы вниз.

Для определения средней скорости частицы можно применить формулу (64), если соблюдено условие безотрывного режима

$$\frac{A\omega^2}{g} \leq \frac{\cos \alpha - p}{\sin \beta}.$$

Экспериментальные исследования показали, что скорость транспортирования тяжелых (минеральных) частиц в верхней выходной зоне рабочего канала в тонком слое практически не зависит от воздушного режима. Например, увеличение скорости воздушного потока от 0 до 2,4 м/с незначительно уменьшает среднюю скорость тяжелой частицы v_k (рис. 50).

Экспериментальные данные и результаты расчета по формуле (64) находятся в прямой и достаточно тесной корреляционной зависимости: коэффициент корреляции составляет 0,91 (рис. 51).

Обязательное условие разделения тяжелых и легких частиц — это одновременное транспортирование их в противоположных направлениях во второй стадии процесса. Для определения направления средней скорости был введен безразмерный коэффициент B , равный по абсолютной величине отношению перемещения частицы вверх к перемещению ее вниз по деке за период колебаний

$$B = \left| \frac{s_+}{s_-} \right|, \quad (297)$$

где значения s_+ и s_- определяются соответственно по формулам (59) и (60).

Используя эти формулы, с учетом $f = \text{tg} \rho$, получим

$$B = \frac{\frac{\text{ctg } \beta}{f} + 1}{\frac{\text{ctg } \beta}{f} - 1} \cdot \frac{\text{tg } \varepsilon - \varepsilon}{\text{tg } \varepsilon - \varepsilon + \pi}. \quad (298)$$

Обозначая

$$a_0 = \frac{\frac{\text{ctg } \beta}{f} + 1}{\frac{\text{ctg } \beta}{f} - 1} \quad (299)$$

и, учитывая, что согласно формуле (41)

$$\varepsilon = \pi \frac{K}{K-1}, \text{ запишем}$$

$$B = a_0 \Phi(K). \quad (300)$$

Как показали расчеты, в области практически используемых параметров функция $\Phi(K)$ с достаточной точностью аппроксимируется зависимостью $\Phi(K) = K^{2,5}$, так что формулу (300) можно записать в виде:

$$B = a_0 |K|^{2,5}. \quad (301)$$

Подставляя в $K = \frac{z_-}{z_+}$ значения z_- и z_+ из уравнения (295), получим после преобразований

$$K = a_0 \frac{\lambda - 1}{\lambda + 1}, \quad (302)$$

Величину λ определяем

$$\lambda = \frac{\sin \alpha}{f(\cos \alpha - p)}. \quad (303)$$

Тогда формулу (300) можно преобразовать к виду

$$B = a_0^{3,5} \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda + 1} \right)^{2,5}. \quad (304)$$

Если $B > 1$, частица транспортируется вверх; если $B = 1$, частица колеблется относительно какой-либо точки деки; если $B < 1$, частица транспортируется вниз.

Условие, обеспечивающее одновременное транспортирование тяжелых и легких частиц в противоположных направлениях, можно записать в следующем виде: $B_n < 1 < B_t$ или, используя формулу (302)

$$a_n \left(\frac{\lambda_n - 1}{\lambda_n + 1} \right)^{2,5} < 1 < a_t \left(\frac{\lambda_t - 1}{\lambda_t + 1} \right)^{2,5}, \quad (305)$$

где индексы n и t относятся к значениям a_0 , λ и f соответственно легкой и тяжелой частиц.

Неравенство (305) позволяет определить влияние различных факторов на процесс разделения. Как видно из формулы (299), различие в коэффициентах a_L и a_T обусловлено только различием в коэффициентах трения. Выполнению неравенств благоприятствуют случаи, когда $f_L < f_T$, так как с уменьшением коэффициента трения увеличивается $\frac{\text{ctg } \beta}{f}$, а следовательно, уменьшается a_0 .

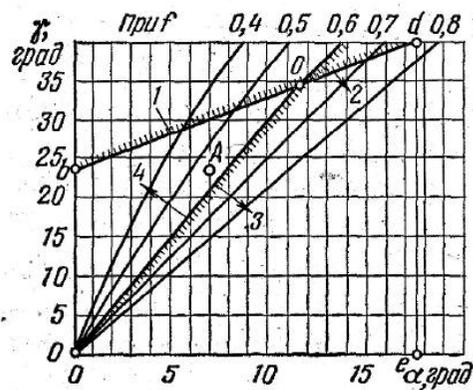
Для увеличения коэффициента λ , как видно из формулы (303), необходимо уменьшать коэффициент трения и увеличивать коэффициент действия воздушного потока p . Одновременное увеличение λ_T и уменьшение λ_B особенно существенно усиливает неравенство (305), а следовательно, повышает четкость разделения тяжелых и легких частиц.

Введем понятие «приведенный коэффициент трения» $f_{пр}$

$$f_{пр} = f \sqrt{1 - \frac{p}{\cos \alpha}} \quad (306)$$

Замена коэффициента трения f приведенным значением $f_{пр}$ дает возможность считать увеличение коэффициента p эквивалентным уменьшению коэффициента трения f при движении частиц без транспортирования.

На графике (рис. 52) увеличение коэффициента влияния воздушного потока от $p=0$ до $p>0$ можно представить как переход от кривой с коэффициентом трения f к кривой с коэффициентом трения $f_{пр} < f$. Например, полагая $\cos \alpha = 1$ для углов $0 < \alpha < 10^\circ$ ($\cos 10^\circ \approx 0,985$), при увеличении p от 0 до 0,3 получим уменьшение коэффициента трения от $f = 0,6$ до $f_{пр} = 0,5$. Если в этом случае $\alpha = 7^\circ$ и $\gamma = \alpha + \beta = 24^\circ$ (т. А), то, как видно из рисунка 52, при $p=0$ ($f_{пр} = f = 0,6$) частица транспортируется вверх, а при $p = 0,3$ ($f_{пр} = 0,5$) — вниз.



В зависимости от величины p одну и ту же точку следует рассматривать по отношению к кривой $f_{пр} = 0,6$ или $f_{пр} = 0,5$. В первом случае точка оказывается над соответствующей кривой, и частица транспортируется вверх; во втором случае она расположена ниже кривой, и частица транспортируется вниз.

Таким образом, разделение компонентов сыпучей смеси при вибропневматическом транспортировании в основном зависит от коэффициента трения по поверхности деки и коэффициента влия-

ния восходящего воздушного потока p , равного отношению нормальной реакции этого потока к силе тяжести частицы [формула (296)]. Однако, как показали дальнейшие исследования, эти параметры не единственные, от которых зависит рассматриваемый процесс.

Очевидно, что одновременное транспортирование тяжелой частицы вверх, а легкой вниз возможно, если

$$f_{пр. T} > f_{пр. L} \quad (307)$$

Для тяжелой частицы

$$f_{пр. T} = f_T \sqrt{1 - \frac{p_T}{\cos \alpha}} \quad (308)$$

Для легкой частицы

$$f_{пр. L} = f_L \sqrt{1 - \frac{p_L}{\cos \alpha}} \quad (309)$$

С учетом формул (308) и (309) неравенство (307) после преобразования можно записать в следующем виде:

$$\left(\frac{f_T}{f_L}\right)^2 > \frac{1 - \frac{p_L}{\cos \alpha}}{1 - \frac{p_T}{\cos \alpha}} \quad (310)$$

Введем обозначение

$$\xi = \frac{p_T}{p_L} \quad (311)$$

Тогда неравенство (310) примет следующий вид:

$$\left(\frac{f_T}{f_L}\right)^2 > \frac{\cos \alpha - p_L}{\cos \alpha - \xi p_L} \quad (312)$$

Полученное неравенство характеризует четкость сепарирования двухкомпонентной зерновой смеси при вибропневматическом процессе сепарирования.

Выясним, от чего зависит четкость сепарирования. Согласно формуле (296)

$$p = \frac{P_b}{mg},$$

где P_b — полная реакция восходящего воздушного потока на частицу.

Обычно для определения этой реакции пользуются формулой Ньютона (59)

$$P_b = \xi_c v_B F_M u^2, \quad (313)$$

где ξ_c — коэффициент сопротивления; v_B — плотность воздуха; F_M — миделево сечение; $u = (v_1 - v_2)$ — относительная скорость частицы в воздушном потоке; v_1, v_2 — соответственно скорости воздушного потока и частицы.

Рис. 52. Кривые зависимости направления средней скорости частиц от коэффициента влияния воздушного потока:

1 — движение без отрыва; 2 — движение с отрывом; 3 — движение вниз; 4 — движение вверх.

Подставляя уравнение (296) в формулу (313), получим выражение для коэффициента влияния воздушного потока в общем виде

$$\rho = \frac{\xi_{с.в} F_M u^2}{mg} \quad (314)$$

С учетом значений ρ для тяжелой и легкой частицы после соответствующих преобразований формула (311) будет выглядеть так:

$$\xi = \left(\frac{\xi_{с.т}}{\xi_{с.л}} \right) \left(\frac{F_{м.т}}{F_{м.л}} \right) \left(\frac{V_{л}}{V_{т}} \right) \left(\frac{\rho_{л}}{\rho_{т}} \right) \quad (315)$$

Здесь массы тяжелой и легкой частицы определяли соответственно по формулам

$$m_{т} = V_{т} \rho_{т};$$

$$m_{л} = V_{л} \rho_{л};$$

где $V_{т}$, $V_{л}$ — объемы тяжелой и легкой частиц; $\rho_{т}$, $\rho_{л}$ — плотности тяжелой и легкой частиц.

Если форма частиц — шары с диаметрами $d_{т}$ и $d_{л}$ и состояние поверхностей одинаковое ($f_{т} = f_{л}$), то миделево сечение их определяли по формуле $F_{м} = \frac{\pi d^2}{4}$ и объем $V = \frac{\pi}{6} d^3$. С учетом этих условий формула (315) примет вид

$$\xi = \left(\frac{d_{л}}{d_{т}} \right) \left(\frac{\rho_{л}}{\rho_{т}} \right) \quad (316)$$

Таким образом, эффективности разделения способствуют увеличение эквивалентного диаметра, плотности и коэффициента трения тяжелой частицы относительно легкой, а также увеличение угла наклона деки к горизонтали и интенсивности воздушного потока в области безотрывных режимов с мгновенными остановками.

Изложенные соображения носят в основном качественный характер, так как в них не учтены такие явления, как изменение ориентации частиц относительно воздушного потока при вибрационном перемещении, изменение порозности частиц, изменение условий взаимодействия частиц при изменении скорости воздушного потока и т. д.

Для большей совокупности размеры частиц, массу и другие свойства следует рассматривать как случайные величины с определенным законом плотности распределения. Приведенные коэффициенты следует рассматривать как их средние значения.

Глава 5. ВИБРАЦИОННОЕ СЕПАРИРОВАНИЕ НА ПЛОСКИХ ЯЧЕЙСТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В технологических процессах сепарирования крупных культур (риса, гречихи) применяют способ сепарирования продуктов шелушения крупных культур на плоских ячейстых поверхностях (крупноотделителях типа БКО). Наибольший эффект был достигнут на машинах этого типа при промежуточном отборе ядра в процессе выработки риса, были получены также положительные результаты и при сепарировании продуктов шелушения гречихи. Смесь шелушенных и нешелушенных зерен сортируется по принципу избирательного транспортирования на плоских вибрирующих ячейстых поверхностях, наклоненных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Каждая точка рабочего органа (деки) машины совершает сложное движение в плоскости UOZ (рис. 53). На всей поверхности деки в шахматном порядке расположены ячей. Их профиль (пологая передняя стенка и отвесная задняя) облегчает при вибрации движение частиц вверх и затрудняет движение их вниз.

Исходный материал подается в верхнем углу рабочего органа. Под действием вибрации зерновая смесь распределяется по всей поверхности деки слоем 10—15 мм. При нормальной работе незакрытым остается только нижний угол деки. Небольшое количество продукта, поступающее отсюда в отсек 2, составляет промежуточную фракцию. По соотношению шелушенных и нешелушенных зерен эта смесь близка к исходной и возвращается на машину.

Шелушенные зерна перемещаются по деке в направлении, перпендикулярном плоскости колебаний, и попадают в отсек 4, а смесь с малым содержанием ядра — в отсек 1, откуда направляется на повторное шелушение.

Регулированием положения гладкой пластины 3 вдоль отсека 4 добиваются минимального количества промежуточной фракции при достаточной чистоте выделенного ядра.

Передняя стенка 5 служит для ограничения движения сыпучего тела.

Изучение механизма разделения зерновой смеси на крупноотделителе БКО-1,5 показало, что явления, происходящие на рабочем органе этой машины, — очень сложны. Это объясняется многообразием форм взаимодействия в поле многих сил частиц между собой, с ячейстой поверхностью и ограничивающими ее стенками. Общая картина процесса усложняется тем, что на конечный результат разделения влияет совокупность физико-механических свойств компонентов, причем роль отдельных признаков изменяется от одного этапа процесса к другому.

Рабочий процесс, протекающий на деке машины, можно условно разделить на три этапа.

На первом этапе зерновая смесь расслаивается под действием вибрации, в результате чего нешелушенные зерна, обладающие

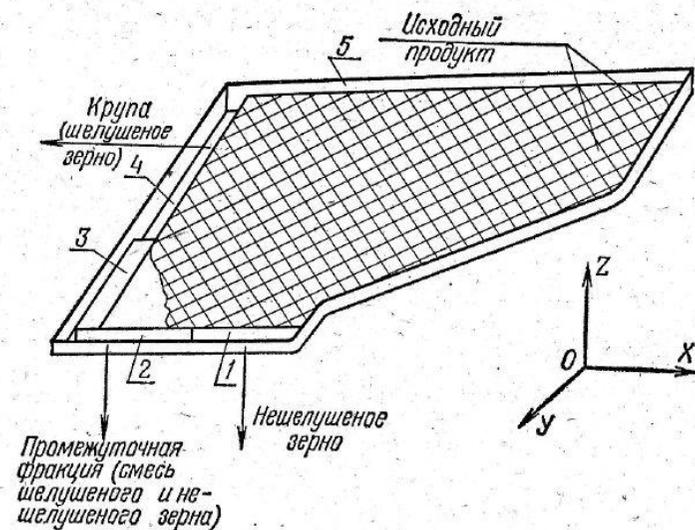


Рис. 53. Схема рабочего органа крупноотделительной машины: 1, 2, 4 — отсеки для вывода отсепарированных фракций; 3 — пластина; 5 — передняя стенка.

меньшей плотностью и несколько большими размерами, а также формой, более удаленной от сферической, оказываются в верхних слоях зернового потока.

На втором этапе всплывшие нешелушенные зерна транспортируются в нижнюю часть деки в направлении нижних окон.

На третьем этапе процесса компоненты разделяются на контрольном, малозагруженном участке рабочего органа (нижний угол деки), на котором решающее влияние на качество разделения оказывают размеры и форма ячеек. Контрольный участок предназначен для дополнительного и окончательного отбора из ядра нешелушенных зерен.

Наблюдение за работой машины, оценка влияния на процесс различных факторов показывают, что наиболее чувствительный к наносимым возмущениям — это второй этап процесса. Интенсивность относительного движения слоев сыпучего тела во многом определяет качество разделения смеси и производительность машины и, таким образом, оказывает решающее влияние на конечный результат работы крупноотделителя.

Для математического описания процесса на этом этапе становится неприемлемым имитирование зернового слоя отдельной материальной частицей, поэтому не представляется возможным непосредственно использовать глубоко развитую теорию вибрационного перемещения отдельной частицы.

В первом приближении реальное сыпучее тело на вибротранспортирующей плоскости можно представить состоящим по толщине из двух слоев, причем один из них расположен на другом и не имеет

контакта с транспортирующей плоскостью. Такая схема дает возможность, отвлекаясь от всей сложности реального процесса, изучить одну из его важных сторон — движение отдельных слоев сыпучего тела с различными скоростями и даже в разных направлениях.

Введем обозначения:

- m_1 — масса верхнего слоя 1;
- m_2 — масса нижнего слоя 2;
- f_1 — коэффициент трения между слоями;
- f_2 — коэффициент трения нижнего слоя о транспортирующую поверхность;
- F_{2-1} — сила трения слоя 1 о слой 2;
- F_{1-2} — сила трения слоя 2 о слой 1;
- F_{0-2} — сила трения слоя 2 о транспортирующую поверхность.

Коэффициенты трения покоя принимают равными соответствующим коэффициентам трения скольжения, причем $f_2 > f_1$, что представляет собой условие относительного движения слоев.

Уравнение абсолютного движения слоев имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_{1a} &= \pm m_1 g f_1; \\ m_2 \ddot{x}_{2a} &= \pm [(m_1 + m_2) g f_2 \pm m_1 g f_1] \end{aligned} \right\} \quad (317)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{1a} &= \pm g f_1; \\ \ddot{x}_{2a} &= \pm g f_2 \left[1 + \frac{m_1}{m_2} \left(1 + \frac{f_1}{f_2} \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (318)$$

где \ddot{x}_{1a} и \ddot{x}_{2a} — ускорения соответственно слоя 1 и 2 в абсолютном движении.

Обозначим:

$$\left. \begin{aligned} f_2' &= f_2 \left[1 + \nu \left(1 + \frac{f_1}{f_2} \right) \right]; \\ f_2'' &= f_2 \left[1 + \nu \left(1 - \frac{f_1}{f_2} \right) \right], \end{aligned} \right\} \quad (319)$$

где f_2' — приведенный коэффициент трения нижнего слоя для случая, когда силы трения, приложенные к этому слою со стороны опорной поверхности и верхнего слоя, направлены в одну сторону; f_2'' — для случая, когда эти силы противоположны друг другу; ν — отношение масс слоев

$$\nu = \frac{m_1}{m_2} \quad (320)$$

Теперь систему уравнений (318) можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{1a} &= \pm g f_1; \\ \ddot{x}_{2a} &= \pm g f_2' \quad \text{или} \quad \ddot{x}_{2a} = \pm g f_2'' \end{aligned} \right\} \quad (321)$$

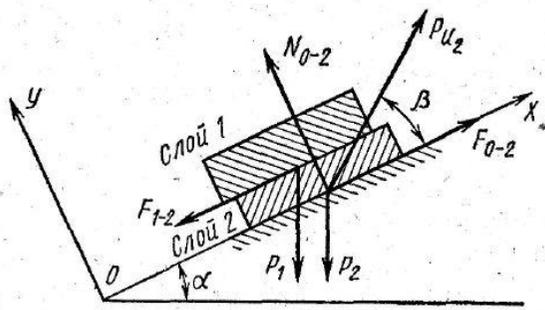


Рис. 54. Схема сил, действующих на нижний слой в относительном движении.

ХОZ, см. рис. 53), составляющий 4—5°, определяет только время обработки продукта и практически не влияет на механизм разделения смеси.

В связи с этим можно исследовать процесс, предполагая, что рабочий орган движется по синусоидальному закону, причем нормаль к транспортирующей поверхности лежит в плоскости колебаний.

Введем переносную систему координат ХОУ (рис. 54), жестко связанную с транспортирующей плоскостью; при этом ось Х направлена вверх параллельно плоскости. На рисунке показана схема сил, приложенных по принципу Даламбера к нижнему слою в относительном движении. Введем обозначения:

- α — угол наклона плоскости к горизонту;
- β — угол вибрации;
- $P_{и2}$ — переносная сила инерции для нижнего слоя;
- N_{0-2} — нормальная реакция плоскости;
- P_1 и P_2 — сила тяжести соответственно верхнего и нижнего слоя.

Уравнения относительного движения этого слоя принимают вид

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2 &= m_2 A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t - m_2 g \sin \alpha + F_{1-2} + F_{0-2}; \\ m_2 \ddot{y}_2 &= (m_1 + m_2) A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t - (m_1 + m_2) g \cos \alpha + N_{0-2}. \end{aligned} \right\} \quad (322)$$

Из второго уравнения системы (322) имеем

$$N_{0-2} = (m_1 + m_2) g \cos \alpha - (m_1 + m_2) A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t. \quad (323)$$

Для безотрывного движения, обеспечивающего более благоприятные условия расслоения смеси, необходимо, чтобы реакция плоскости оставалась положительной, т. е. чтобы $N_{0-2} > 0$, или с учетом уравнения (323)

$$\frac{g}{A \omega^2} \cdot \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} > 1. \quad (324)$$

В этих уравнениях знак «+» соответствует скольжению в положительном направлении (вперед), а знак «-» в отрицательном направлении (назад).

При кинематическом анализе машины было показано [36, 44], что движение точек деки незначительно отличается от гармонического. Поперечный угол наклона рабочего органа (в плоскости

Силы трения определяются соотношениями

$$F_{0-2} = \begin{cases} -f_0 N_{0-2} & \text{при } \dot{x}_2 > 0; \\ +f_2 N_{0-2} & \text{при } \dot{x}_2 < 0. \end{cases} \quad (325)$$

$$F_{1-2} = \begin{cases} -f_1 |N_{1-2}| & \text{при } \dot{x}_2 > \dot{x}_1; \\ +f_1 |N_{1-2}| & \text{при } \dot{x}_2 < \dot{x}_1, \end{cases} \quad (326)$$

где N_{1-2} — давление верхнего слоя на нижний.

Определяется оно следующим образом.

Составим уравнение относительного движения верхнего слоя

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= m_1 A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t - m_1 g \sin \alpha + F_{2-1}; \\ m_1 \ddot{y}_1 &= m_1 A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t - m_1 g \cos \alpha + N_{2-1}. \end{aligned} \right\} \quad (327)$$

При принятом условии $\ddot{y}_1 = 0$ реакция нижнего слоя равна

$$N_{2-1} = -m_1 A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t + m g \cos \alpha. \quad (328)$$

Учитывая, что $N_{1-2} = -N_{2-1}$, имеем

$$N_{1-2} = m_1 A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t - m_1 g \cos \alpha. \quad (329)$$

При положительной относительной скорости нижнего слоя и $\dot{x}_1 < \dot{x}_2$ первое уравнение системы (322) принимает вид

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x} &= m_2 A \omega^2 \cos \beta \sin \omega t - m_2 g \sin \alpha - f_2 [(m_1 + m_2) g \cos \alpha - \\ &- (m_1 + m_2) A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t] - f_1 (m_1 g \cos \alpha - m_1 A \omega^2 \sin \beta \sin \omega t). \end{aligned} \quad (330)$$

Используя приведенные коэффициенты трения нижнего слоя, можно записать

$$\ddot{x}_2 = A \omega^2 \sin \omega t (\cos \beta + f_2 \sin \beta) - g (\sin \alpha + f_2' \cos \alpha). \quad (331)$$

Обозначим углы трения: $\rho_2' = \arctg f_2'$, $\rho_2'' = \arctg f_2''$, $\rho_1 = \arctg f_1$.

Тогда уравнение (331) приводится к виду

$$\ddot{x}_2 = A \omega^2 \frac{\cos(\beta - \rho_2')}{\cos \rho_2'} \left[\sin \omega t - \frac{g}{A \omega^2} \cdot \frac{\sin(\alpha + \rho_2')}{\cos(\beta - \rho_2')} \right] \quad (332)$$

или

$$\ddot{x}_2 = A \omega^2 B_1 (\sin \omega t - b_1). \quad (333)$$

Можно убедиться в том, что при всех возможных вариантах относительного движения слоев уравнение движения каждого слоя приводится к виду

$$\ddot{x}_{1,2} = A\omega^2 B_i (\sin \omega t - b_i), \quad (334)$$

где B_i и b_i — соответствующие коэффициенты.

Перемещения слоев определяются двукратным интегрированием уравнения (334) с соответствующими для каждого слоя и этапа движения коэффициентами B_i и b_i и пределами интегрирования [36].

Полное перемещение за один период x_1 для верхнего слоя и x_2 — для нижнего соответственно равны

$$x_1 = x_1^{(1)} + x_1^{(2)}; \quad x_2 = x_2^{(1)} + x_2^{(2)},$$

где $x_1^{(1)}$ и $x_1^{(2)}$ — перемещение верхнего слоя соответственно вперед и назад; $x_2^{(1)}$ и $x_2^{(2)}$ — перемещение нижнего слоя соответственно вперед и назад.

Средняя скорость каждого слоя (v_1 — для верхнего и v_2 — для нижнего) определяется соотношениями

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= \frac{1}{2\pi} \omega x_1; \\ v_2 &= \frac{1}{2\pi} \omega x_2. \end{aligned} \right\} \quad (335)$$

На рисунке 55,а приведены кривые зависимости безразмерной скорости слоев от угла наклона плоскости α

$$v' = \frac{v}{\omega A} \quad \text{и} \quad \psi = \frac{A\omega^2}{g}, \quad (336)$$

где ψ — амплитудное (безразмерное) ускорение плоскости.

При малых значениях угла α оба слоя движутся в среднем в положительном направлении (вверх). Средняя скорость верхнего слоя может быть больше, меньше или равной скорости нижнего слоя (в зависимости от кинематического режима).

При некотором значении угла $\alpha = \alpha_{кр}$ транспортирования верхнего слоя нет, и при $\alpha > \alpha_{кр}$ наступает направленное движение слоев в противоположных направлениях. Верхний слой транспортируется вниз, в то время как нижний слой — вверх.

Как показала киносъемка, относительное движение слоев сыпучего материала в противоположных направлениях наблюдается в рассматриваемом реальном процессе. Нижние слои продукта, контактирующие с рабочей поверхностью, движутся вверх по деке, а верхние, не контактирующие непосредственно с вибрирующей

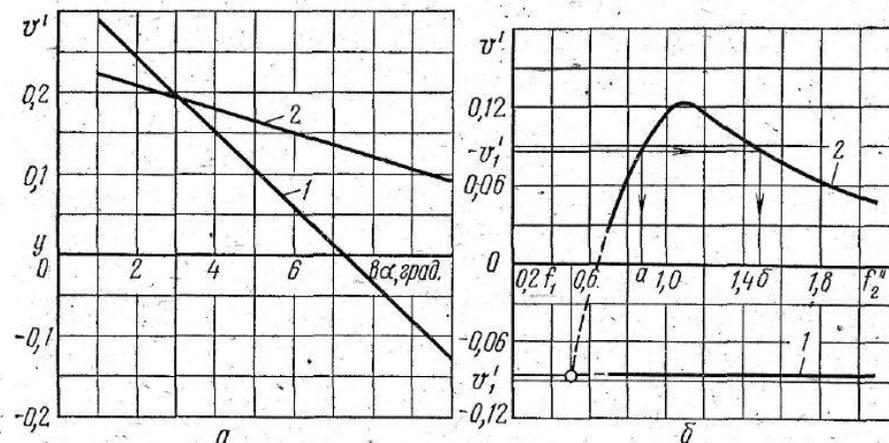


Рис. 55. Кривые зависимости безразмерной скорости слоев от: а — угла наклона плоскости при $f_2'' = 1.3$, $f_1 = 0.5$, $\psi = 1.8$; б — приведенного коэффициента трения нижнего слоя при $\alpha = 9^\circ$, $f_1 = 0.5$ и $\psi = 1.8$; 1 — верхнего слоя; 2 — нижнего слоя.

поверхностью, перемещаются в нижнюю часть рабочего органа. Таким образом, возникает циркуляция продукта в направлении плоскости колебаний, благодаря чему нешелушенные зерна, оказавшись в результате расслоения смеси в верхних слоях зернового потока, перемещаются вместе с ними под уклон и выводятся из машины через нижние сливные окна.

Для стабильной циркуляции сыпучего тела на рабочем органе машины, когда транспортирования нет, необходимо, чтобы количество продукта, поднимающегося по деке, было равно количеству продукта, перемещающегося за это же время вниз. В принятой модели процесса это условие записывается таким образом:

$$K_v = \frac{v_1 m_1}{v_2 m_2} = -1, \quad (337)$$

где $K_v = \frac{v_1}{v_2}$ — коэффициент, равный отношению средних скоростей слоев.

Для зернистого материала значение критического угла наклона плоскости, при котором прекращается направленное транспортирование вверх, несколько выше, чем для отдельной частицы.

На рисунке 55,б показаны кривые зависимости скорости слоев от приведенного коэффициента трения нижнего слоя при кинематическом режиме, обеспечивающем для верхнего слоя движение в среднем вниз.

При малых значениях приведенного коэффициента трения нижнего слоя, близких к f_1 , скорость этого слоя приближается к скорости верхнего; при $f_2'' = f_1$, т. е. $f_2 = f_1$, эти скорости равны и послышного движения нет. При увеличении f_2'' скорость нижнего слоя на-

растает, становится положительной и при некотором значении f''_2 достигает максимума, после чего решающее значение приобретает влияние возрастающих сил сопротивления на подвижность слоя продукта.

Повышение приведенного коэффициента трения до некоторого предельного значения для интенсификации послойного движения в течение периода колебаний и увеличения средних скоростей слоев при циркулировании продукта может быть достигнуто путем увеличения шероховатости транспортирующей поверхности и поддержания определенной толщины сыпучего тела.

Таким образом, относительное движение слоев в противоположных направлениях возможно при одинаковом значении коэффициента трения нижнего слоя при скольжении вверх и вниз. Большое значение коэффициента трения при скольжении вниз, что наблюдается на ячеистой поверхности круподделительной машины типа БКО, интенсифицирует относительное движение слоев.

При уменьшении толщины слоя шелушенных зерен на нижней границе зернового потока уменьшается приведенный коэффициент трения нижнего слоя f''_2 , что, в свою очередь, снижает возможности перемещения этого слоя вверх по вибрирующей поверхности и приводит к повышенному содержанию шелушенных зерен в нижних сходах. Содержание этих зерен в сходе, направляемом на повторное шелушение, составляет 30%, а выход промежуточной фракции достигает 15% от массы исходного продукта.

Для обеспечения постоянной толщины сыпучего тела на всей поверхности деки предлагается заглушить нижние сливные окна 1 и 2 (см. рис. 53) для того, чтобы весь продукт сходил с деки по боковой разгрузочной линии. На границе между нешелушенными зернами и ядром устанавливаются делитель.

Улучшению качества разделения при этом способствует также возросшее время сепарирования. Поскольку контрольного этапа процесса, на котором разделение осуществляется наименее эффективно, нет, то состояние рабочей поверхности ни на одном участке деки не имеет решающего значения. Это уменьшает неблагоприятное влияние возможного загрязнения ячей пылью и мукой и позволяет осуществлять сепарирование различных сыпучих смесей на одной и той же рабочей поверхности.

На рисунке 56,а показано содержание ядра K_1 в продукте вдоль разгрузочной линии, а также выход q верхней фракции в зависимости от положения делителя (за нулевое положение принята крайняя верхняя точка боковой разгрузочной линии, см. рис. 53).

Концентрация ядра в исходной смеси составляет здесь 83%, что наблюдается в производственных условиях при ведении операции круподделения с предварительным отбором шелушенных зерен на ситах.

В верхней части деки содержание ядра K_1 практически равно 100%, затем следует полоса продукта, в которой K_1 уменьшается до нуля, и у нижнего бортика перемещаются нешелушенные зерна.

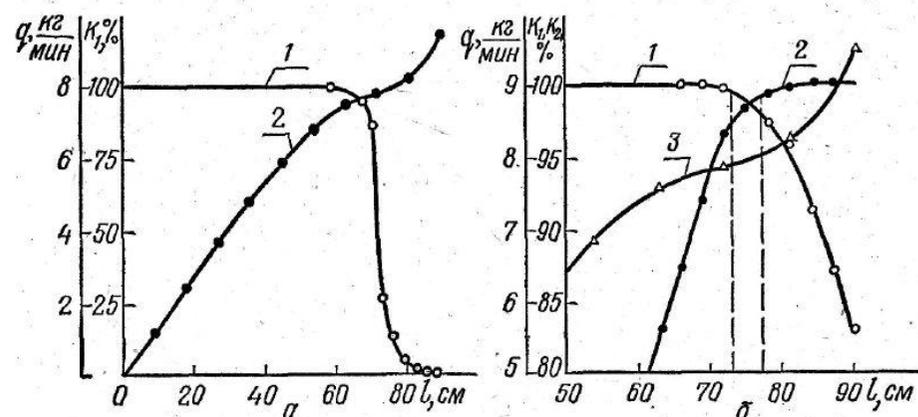


Рис. 56. Результаты исследований экспериментального образца круподделительной машины (с заглушенными сливными окнами):

а — содержание ядра K_1 в продукте по длине разгрузочной линии (1) и выход q верхней фракции в зависимости от положения делителя (2) при $A=29$ мм и $n=210$ кол/мин; б — содержание ядра K_1 (1), нешелушенных зерен K_2 (2) и выход q верхней фракции (3).

На рисунке 56,б показано содержание ядра K_1 и нешелушенных зерен K_2 нарастающим итогом, а также вновь приведена интегральная кривая выхода верхней фракции.

Для получения чистоты верхнего схода 99,5% необходимо установить делитель в точке $l=73$ см; содержанию нешелушенных зерен в нижнем сходе около 96—97% соответствует положение делителя на отметке $l=77$ см. Продукт, сходящий с деки между двумя указанными положениями делителей, составляет промежуточную фракцию.

По разности граничных значений интегральной кривой нагрузки можно определить выход этой фракции. В приведенном примере он составляет 0,1 кг/мин, т. е. приблизительно 1% от нагрузки на рабочий орган.

Достаточно высокая четкость разделения позволяет отказаться от промежуточной фракции, и, таким образом, в результате сепарирования получают два схода:

верхний, состоящий преимущественно из шелушенных зерен и направляемый на дальнейшую обработку (шлифование);

нижний, содержащий в основном нешелушенные зерна и направляемый на повторное шелушение.

При наличии нешелушенных зерен во фракции выделенного ядра не более 1%, как рекомендуется Правилами организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях, содержание шелушенных зерен в нижнем сходе составляет 3—5%. При современном состоянии техники сепарирования смеси шелушенного и нешелушенного риса эти показатели достаточно высоки. Благодаря тому, что нет промежуточной фракции, фактическая производительность машины возрастает на 15%.

Ниже приведен рекомендуемый режим работы крупотделительной машины:

нагрузка на один рабочий орган, кг/мин	9—10
частота колебаний, кол/мин	210, 220, 230
амплитуда колебаний, мм	29
угол вибрации к горизонту, град.	54
продольный угол наклона деки, град.	17—22
поперечный угол наклона деки, град.	5

Производственные испытания крупотделительной машины БКО-1,5 в имеющемся исполнении показали сравнительно эффективную работу ее. Так, по сравнению с 20-канальной падди-машиной фирмы «Нагема» (ГДР) крупотделительная машина БКО-1,5 имеет ряд преимуществ: она занимает меньшую (на 46%) производственную площадь, потребляет втрое меньше электроэнергии и в 4 раза меньше по массе. При этом производительность ее в 1,5 раза выше. В отличие от сложной и громоздкой падди-машины конструкция крупотделительной машины БКО-1,5 значительно проще.

Как показали предварительные опыты, машины с рассматриваемым рабочим органом следует считать перспективными и для сепарирования полуфабриката чая. Ведутся исследования по сортированию на крупотделительной машине БКО-1,5 продуктов шелушения гречихи.

Дальнейшее изучение рабочего процесса крупотделительной машины поможет улучшить технологические показатели ее и расширить область ее промышленного применения.

Глава 6. ВИБРОУДАРНОЕ СЕПАРИРОВАНИЕ

На различных стадиях технологического процесса, таких, как разделение шелушенных и нешелушенных зерен риса, овса, проса, выделение ячменя из овса, выделение спорыньи, полевой редьки, чеснока, камней, проросших, недоброкачественных и изъеденных зерен из зерен основной культуры в отечественной и зарубежной промышленности используют машины с отражательными стенками — так называемые падди-машины.

Имеется ряд гипотез, поясняющих сущность процесса, происходящего в падди-машине, однако до настоящего времени так и не выработано единой точки зрения. В данном разделе приведены сведения о результатах исследований процесса, происходящего в падди-машинах, проведенных во ВНИИЗ и МТИПП [19].

Рабочий элемент сортировочного стола падди-машины (рис. 57) — это зигзагообразные каналы. В машинах производства ГДР, широко распространенных на отечественных предприятиях, количество таких каналов колеблется от 10 до 39. Рабочий канал (рис. 57, б) образуется отражательными стенками, расположенными под углом $\alpha = \text{const}$ к продольной оси канала и плоским днищем, ломаными в зоне приемки продукта таким образом, что в нижней части

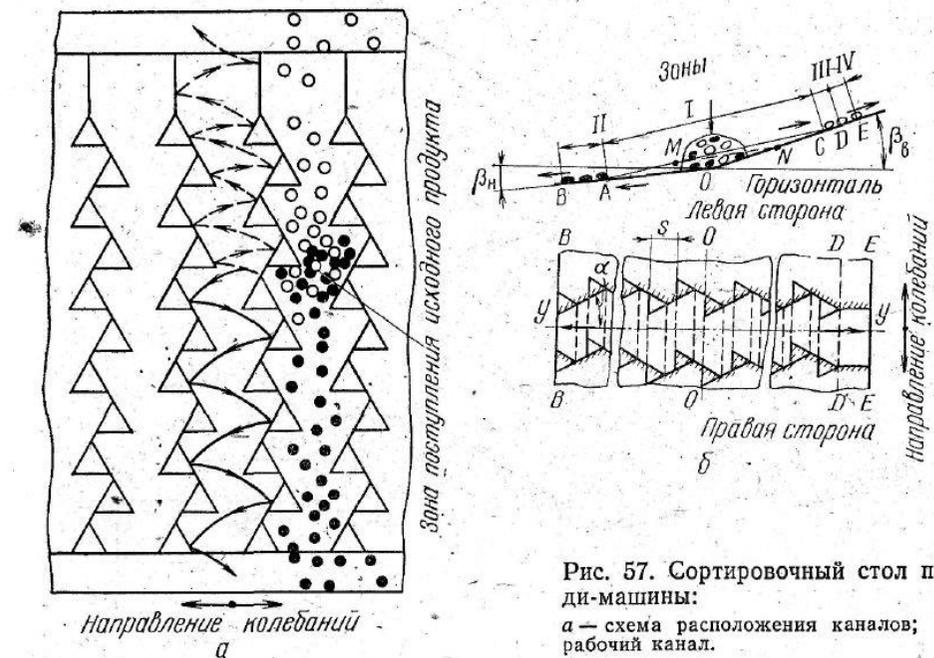


Рис. 57. Сортировочный стол падди-машины:
а — схема расположения каналов; б — рабочий канал.

канала днище имеет угол наклона к горизонту β_n , а в верхней — β_v . В современных конструкциях машин угол $\beta_n > \beta_v$.

Как видно из рисунка 57, б, конфигурация канала в плане — это совокупность последовательно чередующихся рабочих элементов трапециевидальной формы и участков параллелограммной формы.

Исходная смесь поступает сверху в центральную часть канала и образует в зоне I (АОС) сыпучее тело, формируемое под действием колебаний канала. В результате виброударного воздействия смесь самосортируется: частицы меньших размеров и большей плотности погружаются вниз, а частицы больших размеров и меньшей плотности всплывают вверх. Приблизительная линия раздела компонентов смеси (см. рис. 57, б) обозначена ММ.

При установившемся процессе сепарации частицы большей плотности, например шелушенные зерна риса, направляются в нижнюю часть канала и выводятся как нижний сход, а частицы меньшей плотности (нешелушенные зерна) движутся вверх и выводятся верхним сходом.

Выделим один рабочий элемент. Рассмотрим в нем режим регулярного периодического движения материальной частицы массы m , при котором она последовательно ударяется о левую и правую стенки в одних и тех же симметрично расположенных точках (рис. 58). Ударное взаимодействие частицы со стенками считаем упругим и учитываем, согласно гипотезе Ньютона, коэффициентом восстановления R нормальной составляющей скорости

$$R = \frac{v_2^2}{v_1^2} \quad (338)$$

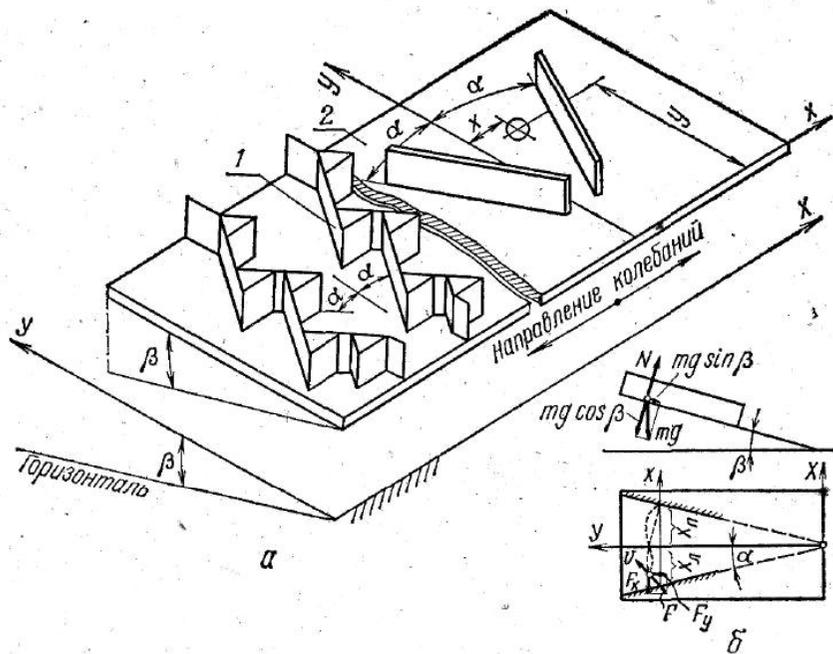


Рис. 58. Перемещение частицы в рабочем канале падающей машины: а — принципиальное устройство канала; б — схема сил, действующих на частицу; 1 — отражательная стенка; 2 — дно канала.

где v_1^n и v_2^n — нормальные составляющие относительной скорости частицы соответственно до и после удара.

Изменение касательной составляющей скорости при ударе учитываем коэффициентом мгновенного трения λ

$$1 - \lambda = \frac{v_2^t}{v_1^t}, \quad (339)$$

где v_1^t и v_2^t — касательные составляющие относительной скорости частицы соответственно до и после удара.

Время соударения считаем бесконечно малым, а условия удара о правую и левую стенку симметричными. Индексы «Л» и «П» применим соответственно для левой и правой стенок, «1» и «2» — до и после удара частицы о стенку.

Полагая переносное движение (движение стола) гармоническими колебаниями, напишем дифференциальные уравнения относительного движения частицы в интервале времени между двумя последовательными ударами

$$m\ddot{x} = mA\omega^2 \sin \omega t - F_x; \quad (340)$$

$$m\ddot{y} = -mg \sin \beta - F_y, \quad (341)$$

где x, y — координаты частицы в относительной (подвижной) системе, жестко связанной со столом; A — амплитуда колебаний; ω — угловая частота; β — угол наклона стола к горизонту; F_x, F_y — проекции силы трения на оси X и Y ; g — ускорение силы тяжести.

$$F_x = fmg \cos \beta \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \quad (342)$$

где f — коэффициент трения скольжения.

$$F_y = fmg \cos \beta \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}. \quad (343)$$

При решении задачи в первом приближении силами сухого трения между дном и частицей можно пренебречь.

Обозначая $\delta = \omega t$, перепишем уравнения (340) и (341) при принятых допущениях, после подстановки, разделения переменных, сокращения на m в следующем виде:

$$dx = A\omega \sin \delta d\delta; \quad (344)$$

$$dy = -\frac{g}{\omega} \sin \beta d\delta. \quad (345)$$

В начальное мгновение относительного движения частицы вправо

$$\delta = \delta_n; \quad \dot{x} = \dot{x}_{n2}; \quad \dot{y} = \dot{y}_{n2}; \quad x = x_n; \quad y = y_n.$$

После интегрирования уравнений (344) и (345) получим

$$x = x_{n2} + A\omega(\cos \delta_n - \cos \delta); \quad (346)$$

$$\dot{y} = \dot{y}_{n2} - \frac{g}{\omega} \sin \beta (\delta - \delta_n). \quad (347)$$

В конечное мгновение движения вправо (начальное мгновение удара о правую стенку)

$$\delta = \delta_n; \quad \dot{x} = \dot{x}_{n1}; \quad \dot{y} = \dot{y}_{n1}; \quad x = x_n; \quad y = y_n.$$

Для этого мгновения уравнения (346) и (347) принимают вид

$$x_{n1} = x_{n2} + A\omega(\cos \delta_n - \cos \delta_n); \quad (348)$$

$$\dot{y}_{n1} = \dot{y}_{n2} - \frac{g}{\omega} \sin \beta (\delta_n - \delta_n). \quad (349)$$

Интегрируем уравнения (346) и (347) на всем интервале движения слева направо

$$\omega(x_n - x_l) = \dot{x}_{l2}(\delta_n - \delta_l) + A\omega[\cos \delta_l(\delta_n - \delta_l) - \sin \delta_n + \sin \delta_l]; \quad (350)$$

$$\omega(y_n - y_l) = \dot{y}_{l2}(\delta_n - \delta_l) - \frac{g}{2\omega} \sin \beta (\delta_n - \delta_l)^2. \quad (351)$$

Из периодичности и регулярности режима и условий симметрии вытекает следующее:

$$1. y_l = y_n; \quad 2. \delta_n = \delta_l + \pi; \quad 3. -x_l = x_n.$$

С учетом этих соотношений из формул (351) и (349) после преобразований получим

$$\dot{y}_{l2} = \frac{\pi g \sin \beta}{2\omega};$$

$$\dot{y}_{n1} = \frac{\pi g \sin \beta}{2\omega}.$$

Обозначим

$$\frac{\pi g \sin \beta}{2\omega} = a; \quad (352)$$

тогда

$$\dot{y}_{l2} = a; \quad (353)$$

$$\dot{y}_{n1} = a. \quad (354)$$

Рассмотрим мгновение удара о левую стенку (рис. 59). Используя соотношения (338) и (339), принятые для описания удара, получим

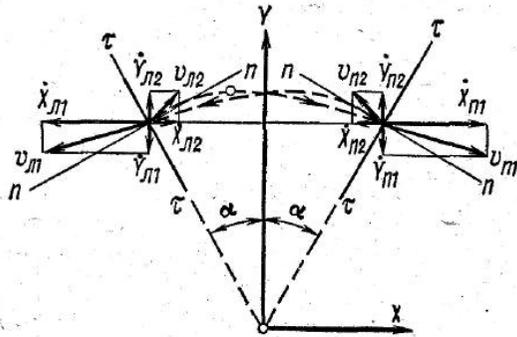


Рис. 59. Траектория относительного движения частицы при периодическом регулярном режиме.

$$v_{n1}^n = \dot{x}_{n1} \cos \alpha + \dot{y}_{n1} \sin \alpha;$$

$$v_{n1}^r = \dot{x}_{n1} \sin \alpha - \dot{y}_{n1} \cos \alpha;$$

$$v_{l2}^n = \dot{x}_{l2} \cos \alpha + \dot{y}_{l2} \sin \alpha;$$

$$v_{l2}^r = \dot{y}_{l2} \cos \alpha - \dot{x}_{l2} \sin \alpha;$$

$$R = \frac{v_{l2}^n}{v_{n1}^n} =$$

$$= \frac{\dot{x}_{l2} \cos \alpha + \dot{y}_{l2} \sin \alpha}{\dot{x}_{n1} \cos \alpha + \dot{y}_{n1} \sin \alpha}; \quad (355)$$

$$1 - \lambda = \frac{v_{l2}^r}{v_{n1}^r} = \frac{\dot{y}_{l2} \cos \alpha - \dot{x}_{l2} \sin \alpha}{\dot{x}_{n1} \sin \alpha - \dot{y}_{n1} \cos \alpha}. \quad (356)$$

Используя выражения (353) и (354), из уравнений (355) и (356) получаем

$$\dot{x}_{n1} = -a \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} \right)}{\operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} - 1 \right)};$$

$$\dot{x}_{l2} = a \left[\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} \right)}{\operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} - 1 \right)} - \frac{2(1-R)}{\left(\frac{1-R}{\lambda} - 1 \right) \sin 2\alpha} \right].$$

Обозначим

$$\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} \right)}{\operatorname{tg} \alpha \left(\frac{1-R}{\lambda} - 1 \right)} = b \quad (357)$$

и

$$\frac{2(1-R)}{\left(\frac{1-R}{\lambda} - 1 \right) \sin 2\alpha} = c, \quad (358)$$

тогда

$$\dot{x}_{n1} = -ab, \quad (359)$$

$$\dot{x}_{l2} = a(b - c). \quad (360)$$

Из условий симметрии удара о правую и левую стенку $\dot{x}_{n1} = -\dot{x}_{l1}$, тогда

$$\dot{x}_{n1} = ab. \quad (361)$$

Подставим в уравнение (348) значение \dot{x}_{n1} и \dot{x}_{l2} из уравнений (360, 361)

$$\cos \delta_l = \frac{ac}{2A\omega}; \quad (362)$$

$$\cos \delta_n = -\frac{ac}{2A\omega}. \quad (363)$$

Введя в уравнение (350) найденные значения, получим

$$x_n = -x_n = -\frac{\pi a}{2\omega} \left(b - \frac{c}{2} \right) - A \sqrt{1 - \left(\frac{ac}{2A\omega} \right)^2}. \quad (364)$$

Для проведения экспериментов спроектировали и изготовили установку с большим диапазоном изменения кинематических параметров: амплитуды от 0 до 150 мм, числа колебаний от 10 до 350 в минуту, угла наклона деки β от 0 до 30° (рабочий орган установки показан на рисунке 58). Угол α изменяется от 0 до 90°. Колеблется рабочий орган по гармоническому закону. Отношение массы рабочего органа к массе частицы ≈ 2500 , поэтому движение частицы практически не влияет на движение рабочего органа.

Опыты проводили так. Частицу сферической формы помещали между отражательными стенками и при ее регулярном периодическом движении проводили скоростную киносъемку. При расшифровке результатов киносъемки получали относительную траекторию центра частицы (см. рис. 59) и измеряли x_n (с учетом размера частицы).

На рисунке 60 кривой 1 аппроксимирована экспериментальная зависимость размера x_n от числа колебаний n (об/мин) при $A = 45$ мм, $\beta = 4^\circ 15'$ и $\alpha = 7^\circ 42'$, полученная для стального шарика и стальных стенок ($R = 0,53$, $\lambda = 0,25$). С ней хорошо согласуется кривая 2.

Рассмотренный в теоретических предпосылках и воспроизведенный экспериментально периодический регулярный режим относительного движения частицы неустойчив. Теоретически это означает, что внесение малых возмущений путем изменения фазового угла, начальной скорости или координаты в мгновение удара приводит к прогрессирующему уходу

от периодического регулярного режима, в результате чего координаты x_n и x_n , а следовательно, y_n и y_n , увеличиваются или уменьшаются от цикла к циклу, и частица начинает в среднем перемещаться вдоль оси симметрии канала. По своему направлению перемещение совпадает с направлением внесенного возмущения.

В экспериментах неустойчивость рассмотренного режима проявляется, во-первых, в том, что частица, помещенная в определенное место канала, совершает регулярное периодическое движение только в течение нескольких циклов (в это время и проводили киносъемку),

а затем по случайным причинам получает направленное в среднем перемещение вверх или вниз. Второе проявление неустойчивости — это направленное движение частицы вниз при начальном помещении ее ниже координаты $y_n = y_n$ и вверх — при помещении ее выше $y_n = y_n$.

Таким образом, найденные значения x_n (364) можно назвать критическими, поскольку они определяют направление среднего за цикл движения частицы в зависимости от ее начального положения в канале.

При изменении коэффициентов R и λ , характеризующих упругость и ударное трение частицы, изменяются значения коэффициентов b и c (357, 358), а следовательно, и значения критических x_n . Существенность этого влияния очевидна из сравнения расчетных кривых 2 и 3 (см. рис. 60).

В свете изложенного легко объяснить принцип действия падди-машин. Допустим, что частицы, требующие разделения компонентов сыпучей смеси, отличаются значениями коэффициентов мгновенного трения ($\lambda_1 = 0,25$ и $\lambda_2 = 0,3$ при $R_1 = R_2 = 0,53$). Минимальный и максимальный размеры элемента рабочего канала, в который они попадают, $x_{\min} = 80$ мм и $x_{\max} = 120$ мм ($A = 45$ мм, $n = 100$ об/мин, $\alpha = 7^\circ 42'$, $\beta = 4^\circ 15'$). Как видно из рисунка 60, при этих данных $x_{n1} = 67,6$ мм, а $x_{n2} = 136$ мм. Тогда для частиц первого компонента ($x_{\min} > x_{n1}$) частицы оказываются выше критического сечения и получают направленное в среднем движение вверх по элементу канала.

Для частиц же второго компонента ($x_{\max} < x_{n2}$) они оказываются ниже критического значения, и их направленное перемещение происходит вниз.

Учитывая случайность начальных условий движения частиц и естественное варьирование их свойств, последовательное соединение ряда рабочих элементов в каждом канале представляется оправданным, так как это увеличивает вероятность полного разделения компонентов смеси.

Изложенные теоретические предпосылки подтвердились при анализе процесса разделения в падди-машинах шелушеного и нешелушеного риса, а анализ полученных зависимостей в сопоставлении с результатами определения ударно-фрикционных свойств различных зерновых смесей создает предпосылки для оптимизации режимов имеющихся машин и усовершенствования их конструкций на различных операциях сепарирования.

Экспериментальные исследования падди-машин позволили выявить ряд общих закономерностей процесса сепарирования. В частности, было установлено, что:

оптимальные качественные и количественные показатели процесса сепарирования шелушеного и нешелушеного риса достигаются в узкой области значений амплитуды A и угловой частоты ω , а их влияние на процесс сепарирования определяется величиной амплитудного ускорения $A\omega^2$;

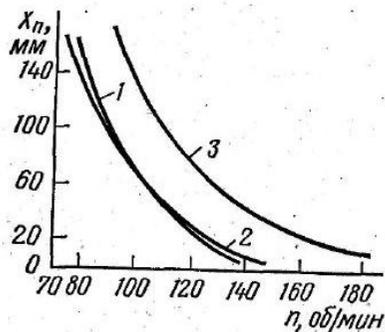


Рис. 60. Кривые зависимости критической координаты (мм) от числа колебаний:

1 — кривая, построенная по результатам эксперимента при $R=0,53$ и $\lambda=0,25$; 2 — кривая, построенная по результатам табулирования зависимости (364) при тех же параметрах процесса; 3 — кривая, построенная по результатам табулирования при $R=0,53$ и $\lambda=0,3$.

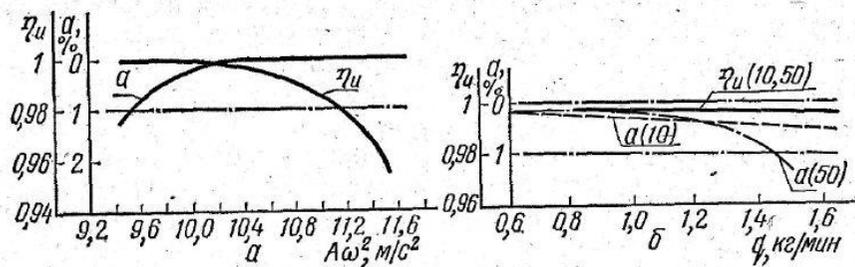


Рис. 61. Кривые зависимости коэффициента извлечения ядра и четкости сепарирования при концентрации зерна в исходной смеси 50% и 10% от: а — амплитудного ускорения $A\omega^2$; б — нагрузки на канал q .

определенному углу наклона канала к горизонтальной плоскости (β_B , см. рис. 57) соответствует вполне определенная величина амплитудного ускорения, зависимость β_B ($A\omega^2$) — линейная, причем с увеличением β_B увеличивается и $A\omega^2$;

с увеличением концентрации, нагрузки и влажности исходных продуктов эффективность сепарирования снижается.

На рисунке 61, а приведены кривые зависимости коэффициента извлечения η_u и четкости сепарирования a (содержания зерна в ядре в процентах) от амплитудного ускорения канала при постоянных: угле наклона β_B , нагрузки на канал $q = 0,65$ кг/мин и концентрации зерна в исходной смеси 50% и 10%. Опыты проводили при различных значениях амплитуды колебаний: от 82 до 122 мм. Как видно из данного рисунка, увеличение амплитудного ускорения приводит к уменьшению коэффициента извлечения, а уменьшение его — к ухудшению качества нижнего схода*.

На рисунке 61, б приведены кривые зависимости коэффициента извлечения η_u и четкости сепарирования a при различной концентрации зерна в исходной смеси и постоянном амплитудном ускорении $A\omega^2$ и угле наклона канала к горизонтали β_B . Как видно из данного рисунка, коэффициент извлечения ядра с увеличением нагрузки (q , кг/мин) и концентрации зерна в исходной смеси меняется несущественно, в то время как четкость сепарирования постепенно ухудшается и при больших концентрациях зерна в исходной смеси и больших нагрузках начинает превышать допустимый предел, установленный Правилами организации и ведения технологического процесса на крупяных предприятиях. При увеличении влажности продуктов шелушения риса оптимальные качественные показатели, т. е. максимальный коэффициент извлечения ядра при минимальном проценте содержания зерна в ядре, достигаются при более высоких амплитудных ускорениях.

На рисунке 62, а приведены кривые зависимости коэффициента извлечения ядра η_u и четкости сепарирования a от частоты коле-

* На рисунках 61 и 62 штрихпунктирной линией показано предельное значение $a = 1\%$, допускаемое перед направлением крупы на шлифование.

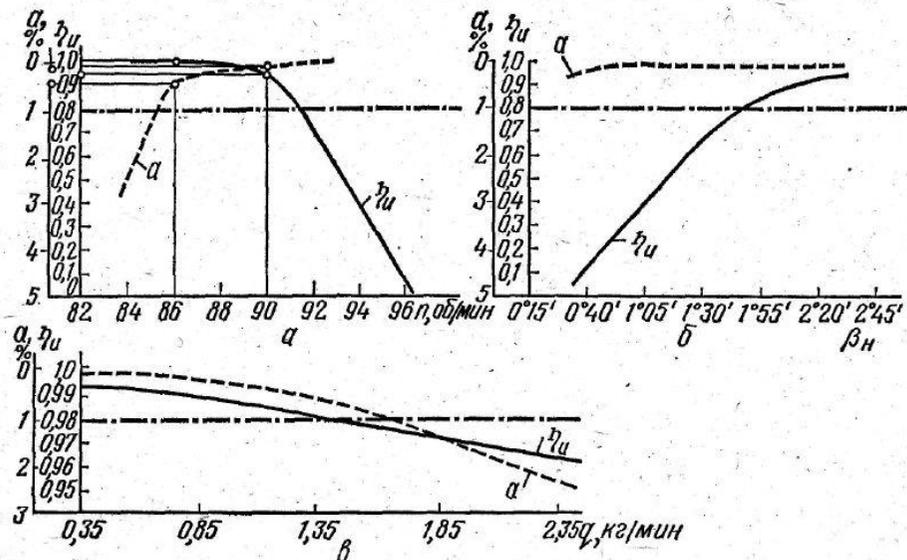


Рис. 62. Кривые зависимости коэффициента извлечения ядра и четкости сепарирования от: а — частоты колебаний n ; б — угла наклона кузова β_B ; в — нагрузки на канал q .

баний n сортировочного стола при амплитуде колебаний $A = 112$ мм, нагрузке на канал $q = 0,9$ кг/мин и угле наклона $\beta_B = 1^\circ 30'$. Из графиков видно, что оптимальная частота колебаний составляет 86—90 кол/мин. При такой частоте достигаются высокий выход ядра $\eta_u \approx 0,96—1,0$ и четкость сепарирования $a \approx 0,1—0,4\%$. Снижение частоты колебаний ухудшает качество нижнего схода, а увеличение уменьшает его выход.

Кривые влияния угла наклона кузова β_B при содержании нешелушенных зерен в исходной смеси 13% представлено на рисунке 62, б ($A = 112$ мм, $n = 92$ об/мин, $q = 1,1$ кг/мин). Оптимальным значением угла наклона кузова следует считать $2,5^\circ$. С уменьшением этого угла уменьшается выход ядра, с увеличением его ухудшается чистота ядра.

Влияние нагрузки на один канал пади-машины исследовали при содержании в исходном продукте 13% нешелушенных зерен.

Результаты испытаний при $A = 112$ мм, $n = 88$ об/мин, $\beta_B = 1^\circ 30'$ показывают, что удовлетворительные результаты сортирования можно получить при удельной нагрузке на один канал до 1,5 кг/мин, или до 2 т/сутки (рис. 62, в). Более значительные нагрузки приводят к снижению технологической эффективности сепарирования (извлечения ядра и четкости сортирования).

Принцип воздушной сепарации использован во многих сепарирующих машинах, особенно в машинах для очистки зерновых культур. Объясняется это сравнительной простотой пневмосепарирующих устройств и разными аэродинамическими признаками примесей и зерновок. Однако идеально разделить смесь невозможно. Обычно в производственных условиях при очистке зерна средней засоренности эффективность выделения примесей, составляющая в среднем до 60—70% при четкости сепарирования до 2%, свидетельствует о вполне удовлетворительной работе пневмосепарирующего устройства.

В современных зерноочистительных машинах применяют несколько способов очистки зерна с использованием воздушного потока:

- сепарирование в вертикальном воздушном потоке;
- сепарирование в наклонном или поперечном воздушном потоке;
- воздушное сепарирование с использованием поля центробежных сил;
- воздушное сепарирование с использованием кинетической энергии компонентов сепарируемой смеси;
- пнемоинерционное сепарирование;
- пневмоситовое сепарирование;
- аэромеханическое сепарирование зерна в условиях внутрицехового пневмотранспорта.

Были получены положительные экспериментальные результаты применения нового способа пневмосепарирования продуктов шелушения крупяных культур с использованием псевдооживленного слоя.

Наибольшее распространение благодаря конструктивной простоте и компактности устройства получил способ сепарирования зерновой смеси в вертикальном воздушном потоке. Его применяют в современных зерновых сепараторах, пневмосепараторах и аспираторах отечественного и зарубежного производства.

Поперечный воздушный поток все реже применяют в машинах, и он сохранился главным образом там, где конструктор не связан требованиями к компактности машин, например в очистительных машинах, используемых на зерновых токах.

Современные зерноперерабатывающие предприятия в основном оснащены машинами различных модификаций с сепарированием в вертикальном воздушном потоке. К машинам такого типа относят воздушно-ситовые ворохоочистители ЗВ-50, ЗД-10, сепараторы ЗСМ, ЗВС, пневматические сепараторы БПС, аспираторы и аспирационные колонки ЗПА, БАС, БКА, БДА, БВЗ и другие. Большинство передовых фирм ФРГ («Миаг»), Швейцарии («Бюллер»), США («Хэпт Картер»), Англии («Генри Саймон»), Италии («Окрим», «Гольфетто») и других стран выпускают машины такого же типа.

§ 1. Сепарирование в вертикальном воздушном потоке

Вертикальный воздушный поток в пневмосепарирующем канале можно создать двумя способами: разрежением и нагнетанием. Во втором случае необходимо подавать зерновую смесь при помощи сетки, перекрывающей поперечное сечение канала. Исследования показали, что высокой производительности и четкости сепарирования при вводе зерна в канал при помощи сетки получить невозможно, поэтому данный способ не применяют в конструкциях машин зерноперерабатывающих предприятий.

Несмотря на простоту процесса аналитическое решение задачи определения траекторий, скоростей и ускорений зерновок и примесей при взаимодействии их с воздушным потоком затруднено, и прежде всего по следующим причинам: зерновая смесь поступает в канал многослойным потоком, в зоне сепарирования частицы соударяются, изменяется скорость воздушного потока в межзерновом пространстве, нарушается равномерность поля скоростей воздушного потока и т. д.

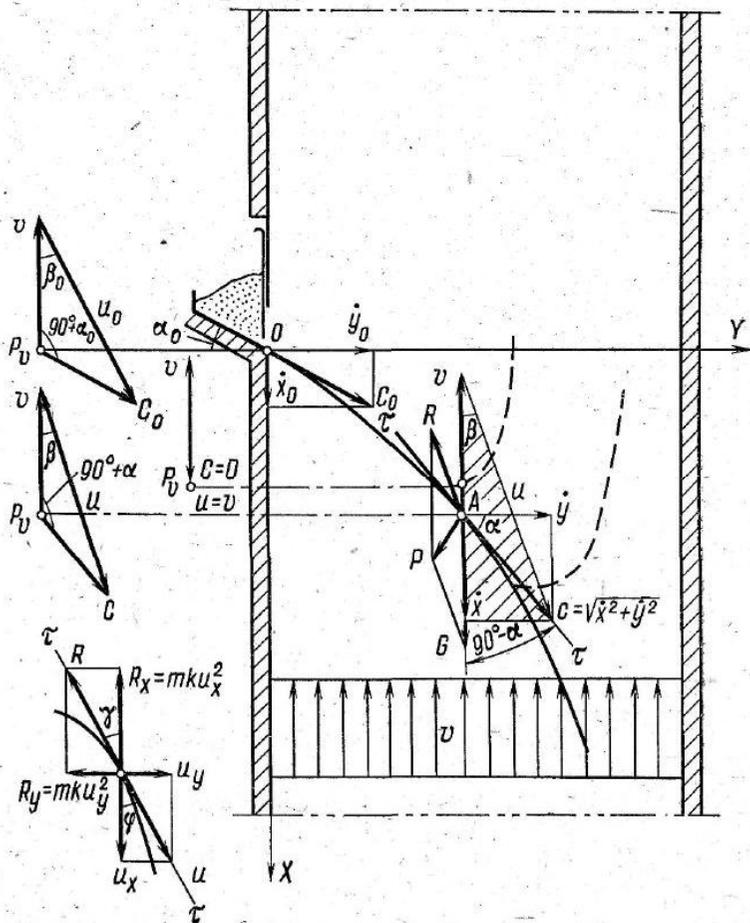
В настоящее время исследователями теории процесса пневмосепарирования сделаны попытки [56] учесть на основе теорий вероятности факторы многослойности потока и взаимодействия зерновок и примесей в зоне сепарирования, однако эти вопросы разработаны еще не настолько полно, чтобы их можно было использовать для строгого аналитического описания процесса воздушного сепарирования.

В последних исследованиях процесса пневмосепарирования зерна в вертикальном воздушном потоке (П. Н. Платонов, А. И. Папченко, Б. И. Зюзьков, З. Х. Ицекзон, А. С. Матвеев, С. С. Шкляров и другие) рассмотрено влияние основных факторов на эффективность процесса, разработаны предложения по повышению его эффективности. В то же время физическая картина процесса и движение частиц сепарируемого материала не получили более полного отражения, чем в работах А. Я. Малиса, и нуждаются в дальнейшем развитии.

Рассмотрим пневмосепарирование как физический процесс разделения небольшого числа частиц тяжелого и легкого компонентов вертикальным воздушным потоком.

В пневмосепарирующий канал (рис. 63) зерновка поступает под углом к горизонтали с некоторой начальной скоростью C_0 . С момента встречи с воздушным потоком ее движение можно рассматривать как сложное, состоящее из переносного (с воздушным потоком) и относительного (относительно потока).

Воздушный поток действует на зерновку со скоростью v . Зная значение начальной скорости зерновки C_0 и воздушного потока v , можно в соответствии с векторным уравнением $\vec{C} = \vec{v} + \vec{u}$ и соответствующим планом скоростей (см. рис. 63) определить величину и направление скорости зерновки в относительном движении u .



К определению направления реакции воздуха

Рис. 63. Схема сил, действующих на зерновку в вертикальном пневмосепарирующем канале.

$$u = \sqrt{v^2 + C_0^2 + 2vC_0 \cos(90^\circ + \alpha)} = \sqrt{v^2 + C_0^2 + 2vC_0 \sin \alpha} \quad (365)$$

Направление скорости, определяемое углом к направлению воздушного потока β_0 , можно получить из выражения

$$\sin \beta_0 = \frac{C_0}{u} \sin(90^\circ + \alpha) \quad \text{или} \quad \sin \beta_0 = \frac{C_0}{u} \cos \alpha \quad (366)$$

В воздушном потоке на зерновку массой m действует сила тяжести $G = mg$ и сила сопротивления воздушного потока (реакция

воздуха) $R = \xi \frac{\rho}{2} F_M u^2$ (при турбулентном режиме потока),

а с учетом $K = \frac{\xi \frac{\rho}{2} F_M}{m}$ (коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления)

$$R = mKu^2, \quad (367)$$

где $\xi = f(\text{Re})$ — коэффициент аэродинамического сопротивления; F_M — миделево сечение зерновки, м^2 ; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величина коэффициента ξ зависит от формы частиц и числа Рейнольдса (Re), обтекающего ее. Значения коэффициента для шаровидных, угловатых и пластинчатых частиц в зависимости от числа Рейнольдса приведены в специальной литературе.

При ламинарном режиме воздушного потока, что в практике пневмосепарирования зерновых смесей встречается реже, силу сопротивления R для частицы сферической формы описывают уравнением Стокса

$$R = 3\pi\mu du, \quad (368)$$

где $\mu = \nu\rho$ — динамический коэффициент вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$; d — диаметр частицы, м ; ν — кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$.

Дифференциальные уравнения движения зерновки в координатах XOY (см. рис. 63) запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} &= mg - R \cos \beta; \\ m\ddot{y} &= -R \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (369)$$

Запишем выражение для относительной скорости

$$u^2 = (v + \dot{x})^2 + \dot{y}^2 \quad \text{или} \quad u^2 = v^2 \left[\left(1 + \frac{\dot{x}}{v} \right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v} \right)^2 \right]. \quad (370)$$

Здесь многие исследователи произвольно делают ошибку, выбирая направление реакции воздуха согласно ее составляющим по осям координат. Покажем это на примере (см. рис. 63); доказав, что углы φ и γ неравны, т. е. направление реакции воздуха R выбрано неправильно, поскольку во внимание не принята квадратичная зависимость реакции воздуха от ее относительной скорости

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{u_x}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2}} \quad \text{и} \quad \sin \gamma = \frac{R_x}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}} = \\ &= \frac{mKu_x^2}{\sqrt{(mKu_x^2)^2 + (mKu_y^2)^2}} = \frac{u_x^2}{\sqrt{u_x^4 + u_y^4}}, \quad \text{т. е.} \quad \varphi \neq \gamma. \end{aligned}$$

Таким образом, направление реакции воздуха, определенное по составляющим R_x и R_y , не соответствует направлению относительной скорости, единственно правильно определяющей направление реакции R .

Преобразуем уравнение (369) и с учетом уравнения (370) запишем

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= g - Ku \cdot u \cos \beta = g - Kv \sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2} \cdot (v + \dot{x}); \\ \ddot{y} &= -Ku \cdot u \sin \beta = Ku \dot{y} = -Kv \sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2} \dot{y}. \end{aligned} \right\} (371)$$

Или окончательно

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= g - Kv^2 \sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2} \left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right); \\ \ddot{y} &= -Kv \sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2} \left(\frac{\dot{y}}{v}\right). \end{aligned} \right\} (372)$$

Анализ выражения $\sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2}$ в пределах практических значений режимов сепарирования и скоростей перемещения зерновки в канале показывает, что его величина изменяется в не больших пределах (1,02—1,12) и для приближенного решения может быть принята постоянной

$$\psi = \sqrt{\left(1 + \frac{\dot{x}}{v}\right)^2 + \left(\frac{\dot{y}}{v}\right)^2} = \psi_{cp} = \text{const.}$$

Для частиц примесей значение ψ колеблется в значительно больших пределах, однако его среднее значение находится в области, близкой значению $\psi=1,06$. Поэтому возможность использования аналитических зависимостей для частиц, выделяющихся в верхней части канала, рассмотрена с учетом полученных экспериментальных данных.

Уравнения (372) с учетом $\psi = \text{const}$ запишутся в виде

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= g - Kv^2\psi - Kv\psi\dot{x}; \\ \ddot{y} &= -Kv\psi\dot{y}. \end{aligned} \right\} (373)$$

Введем обозначение $Kv\psi = a$ и $Kv^2\psi = b = av$, тогда

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= (g - b) - ax; \\ \ddot{y} &= -ay. \end{aligned} \right\} (374)$$

Интегрируя уравнения (373, 374) при начальных условиях $t=0$; $x=0$; $y=0$; $\dot{x}=\dot{x}_0$; $\dot{y}=\dot{y}_0$, получаем аналитические зависимости для составляющих скорости и перемещения зерновки в пневмосепарирующем канале, в окончательном виде представленные ниже

$$\dot{x} = \frac{1}{Kv\psi} \left\{ (g - Kv^2\psi) - [(g - Kv^2\psi) - Kv^2\psi\dot{x}_0] e^{-Kv\psi t} \right\}; (375)$$

$$\dot{y} = \frac{\dot{y}_0}{e^{Kv\psi t}}; (376)$$

$$x = \frac{g - Kv^2\psi}{Kv\psi} t - \frac{1}{(Kv\psi)^2} [(g - Kv^2\psi) - Kv\psi\dot{x}_0] (1 - e^{Kv\psi t}); (377)$$

$$y = \frac{\dot{y}_0}{Kv\psi} (1 - e^{-Kv\psi t}). (378)$$

Решение исходных уравнений без оговоренных допущений на ЭВМ «Минск-22М» проводили с приведением их к виду, например для $v = 5$ м/с

$$\ddot{x} = 9,8 - K(5 + \dot{x}) \sqrt{(5 + \dot{x})^2 + \dot{y}^2}; (379)$$

$$\ddot{y} = -Ky \sqrt{(5 + \dot{x})^2 + \dot{y}^2} (380)$$

и тех же начальных условиях $x=0$, $y=0$, $t=0$, $\frac{\dot{x}_0}{v} = \frac{\dot{x}}{v}$,

$$\frac{\dot{y}}{v} = \frac{\dot{y}_0}{v}.$$

При этом определены значения скоростей и траекторий зерна и примесей в широких пределах варьируемых параметров: $v = 4-8$ м/с; $C_0 = 0,2-0,8$ м/с; $\alpha = -10-+40^\circ$; $K = 0,05-9,8$ м⁻¹ при времени сепарирования $t = 0,2$ с и ширине канала, ограничивающегося координатой $y = 0,16$ м, соответствующей реальным значениям для высокопроизводительных машин.

Определению значений скоростей и траекторий зерновок предшествовало решение уравнений относительно K — коэффициента пропорциональности силы аэродинамического сопротивления, при котором абсолютная скорость частиц в потоке приобретает значение, близкое нулю, т. е. частицы «взвешиваются». Установление таких значений коэффициента K при различных режимах сепарирования и сравнение их с экспериментальными данными для реальных частиц зерновок и примесей позволяют в первом приближении оценить возможность разделения компонентов, а также установить степень влияния параметров канала и режимов сепарирования на взвешивание частиц с одинаковым значением коэффициента K .

Установлена следующая закономерность: при угле ввода $\alpha = 0^\circ$ скорость ввода частицы в канал не влияет на условие ее взвешивания, при отрицательных углах ввода большая скорость улучшает условия взвешивания и уменьшает время достижения частицей равновесного состояния, а при положительных углах ввода увеличение скорости имеет обратное влияние. Уменьшение угла ввода до 0° и далее в область отрицательных значений способствует взвешиванию частиц в ограниченном по размерам пневмосепарирующем канале. Зависимость $K_{взв}$ при $\alpha = 0^\circ$, $C_0 = 0,2-0,8$ м/с от режима воздушного потока v_b имеет нелинейный характер, причем в области 3,5–5,0 м/с изменения коэффициента пропорциональности K более значительны, что в целом свидетельствует о больших возможностях пневмосепарирования на этих режимах.

Коэффициент пропорциональности $K = \xi \frac{\rho F_M}{2m}$ определяется физико-механическими свойствами частицы и коэффициентом аэродинамического сопротивления, зависящим от режима воздушного потока и формы частиц $\xi = f(Re, \Phi)$.

С другой стороны, при взвешивании частицы в потоке коэффициент K можно определить из равенства $R = G$, т. е. $mKu^2 = G$, откуда при

$$u = v_{вт}, \quad K = \frac{g}{v_{вт}^2} \quad (381)$$

Значения коэффициента K , выбранные для решения уравнений на ЭВМ, проверены по зависимости (381). При этом определены скорости витания зерновок и частиц примесей для того, чтобы при теоретическом решении охватить наиболее вероятный диапазон для зерновок и частиц примесей, встречающихся в реальных условиях пневмосепарирования зерновых смесей. Например, для зерновок принято: $K = 0,05 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 14 \text{ м/с}$); $K = 0,12 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 9,0 \text{ м/с}$) и $K = 0,25 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 6,25 \text{ м/с}$), а для частиц примесей $K = 9,8 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 1,0 \text{ м/с}$); $K = 1,1 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 3,0 \text{ м/с}$) и $K = 0,2 \text{ м}^{-1}$ ($v_{вт} = 7,0 \text{ м/с}$).

На рисунке 64 приведены траектории зерновок и частиц примесей при различных условиях ввода в зону сепарирования и скоростях воздушного потока 5,0 и 6,0 м/с по результатам решения системы дифференциальных уравнений (380) на ЭВМ «Минск-22М», которые были проведены для всех основных режимов сепарирования $v_b = 4-8 \text{ м/с}$.

Анализ траекторий частиц показывает, что полного разделения зерновой смеси в канале не достигают в связи с перекрывающимися значениями признаков разделения зерновок и частиц примесей. При реальных значениях $v_b = 5,0-6,0 \text{ м/с}$ все частицы с $K \leq 0,25 \text{ м}^{-1}$ выделяются в нижней части канала, а при $v_b = 8,0 \text{ м/с}$ воздушным потоком практически уносятся все частицы с $K \geq 0,2 \text{ м}^{-1}$.

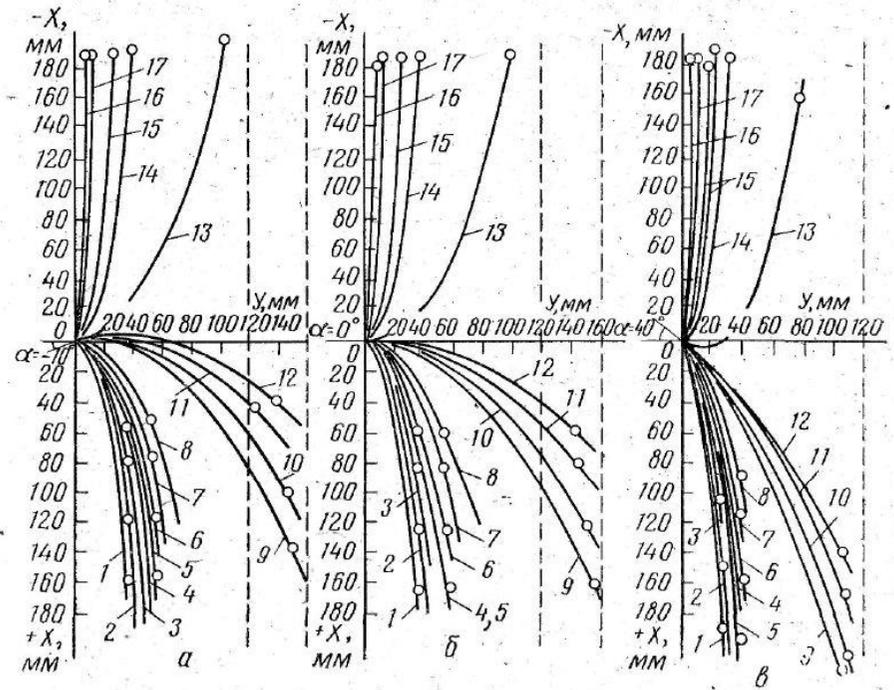


Рис. 64. Траектории зерновок и частиц примесей (теоретическое исследование) при различных условиях ввода в зону сепарирования и скорости воздушного потока 5 м/с (K , м^{-1} , C_0 , м/с):

a — при $\alpha = -10^\circ$: 6 — при $\alpha = 0^\circ$; β — при $\alpha = 40^\circ$; 1 — $K = 0,05 \text{ м}^{-1}$, $C_0 = 0,2$; 2 — $K = 0,12$, $C_0 = 0,2$; 3 — $K = 0,2$, $C_0 = 0,2$; 4 — $K = 0,25$, $C_0 = 0,2$; 5 — $K = 0,05$, $C_0 = 0,3$; 6 — $K = 0,12$, $C_0 = 0,3$; 7 — $K = 0,2$, $C_0 = 0,3$; 8 — $K = 0,25$, $C_0 = 0,3$; 9 — $K = 0,05$, $C_0 = 0,8$; 10 — $K = 0,12$, $C_0 = 0,8$; 11 — $K = 0,2$, $C_0 = 0,8$; 12 — $K = 0,25$, $C_0 = 0,8$; 13 — $K = 1,1$, $C_0 = 0,8$, $t = 0,19 \text{ с}$; 14 — $K = 1,1$, $C_0 = 0,3$, $t = 0,19 \text{ с}$; 15 — $K = 1,1$, $C_0 = 0,2$ ($K = 9,8$, $C_0 = 0,8$), $t = 0,19 \text{ с}$; 16 — $K = 9,8$, $C_0 = 0,2$, $t = 0,07 \text{ с}$; 17 — $K = 9,8$, $C_0 = 0,3$, $t = 0,07 \text{ с}$.

Поэтому понятие «примеси, отделяемые воздушным потоком» конкретно для каждого вида сепарируемой смеси, определяемой физико-механическими свойствами компонентов и в первую очередь кривыми распределения коэффициентов пропорциональности силы аэродинамического сопротивления или скоростей витания зерновок и частиц примесей. Предельное значение «отделимости» примесей следует устанавливать по значениям K или $v_{вт}$, характерным для наиболее легких зерновок основной культуры.

Способ ввода частиц в канал, и в частности угол ввода, как это видно из траекторий зерновок и частиц примесей (см. рис. 64), существенно влияет на условия сепарирования при всех исследованных режимах. Рассмотрим это для наиболее характерных режимов сепарирования, применяемых в практике очистки зерна от аэродинамически легких примесей ($v_b = 5,0-6,0 \text{ м/с}$). Ввод зерновок и частиц примесей с широким диапазоном аэродинамических свойств в пневмосепарирующий канал под углом $\alpha = 40^\circ$ дает более концентрированные пучки частиц, выделяемые как в нижней,

так и в верхней части канала. Например, при $v_b = 5,0$ м/с и $\alpha = 40^\circ$ все частицы с $K = 0,25-0,05$ м⁻¹ в нижней части канала группируются в пучок с основанием около 95 мм по ординате $+X = 180$ мм (см. рис. 64, в), а при $\alpha = -10^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ основание пучка на той же ординате вдвое больше. Такая же закономерность сохраняется и при $v_b = 6,0$ м/с и других скоростях. Это говорит о том, что условия сепарирования для захвата и выноса частиц воздушным потоком при углах их ввода в канал $\alpha = -10^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ более благоприятны.

Пучки траекторий при углах ввода $\alpha = -10^\circ$ и $\alpha = 0^\circ$ различаются незначительно, при этом, учитывая, что для ввода частиц под отрицательными углами необходимо оснащение пневмосепарирующих устройств бросковыми приемниками и приводными устройствами, целесообразнее вводить продукт под углом $\alpha = 0^\circ$, что можно обеспечить при гравитационном способе подачи сепарируемой смеси в канал.

В меньшей степени влияет, особенно в области углов ввода, близких к 0° , на траекторию частиц начальная скорость их ввода. Например, при $v_b = 5,0$ м/с и $\alpha = 0^\circ$ частица с $K = 0,25$ м⁻¹ при $C_0 = 0,8$ м/с перемещается по оси Y на 140 мм и по оси $+X$ на 60 мм (кривая 12, рис. 64, б), а при $C_0 = 0,2$ м/с и том же перемещении по оси $+X$ — всего на 35 мм (кривая 4, рис. 64, б). При угле $\alpha = 40^\circ$ и прочих равных условиях перемещение по оси Y соответственно составляет 35 и 20 мм (рис. 64, в). При скорости $v_b = 6$ м/с эта закономерность сохраняется, при этом разница перемещений по оси Y еще увеличивается.

Большие скорости ввода обуславливают достижение частицами противоположной стенки канала за короткий промежуток времени. Например, при $v_b = 5$ м/с, $\alpha = 0^\circ$, $K = 0,25$ м⁻¹ и $C_0 = 0,8$ м/с (кривая 12, рис. 64, б) частица за время $t = 0,2$ с практически пересекает канал с $B = 140$ мм, т. е. при больших скоростях сокращается время нахождения частицы в зоне сепарирования, поэтому скорость $C_0 = 0,8$ м/с можно считать предельной, а оптимальной следует считать начальную скорость частицы в пределах $0,2-0,4$ м/с при $\alpha = 0^\circ$.

Решение уравнений на ЭВМ «Минск-22М» проведено в диапазоне $0-0,2$ с с интервалом $0,01$ с, т. е. в основном траектории построены по 21 точке. Соответственно для каждой точки получены значения скоростей частицы. В таблице 15 приведены значения скоростей для частиц с $K = 0,12$ м⁻¹ при угле ввода $\alpha = 40^\circ$ и начальной скорости $C_0 = 0,8$ м/с. При скоростях воздушного потока в диапазоне $5-7$ м/с характер движения частиц равноускоренный, а при $v_b = 8$ м/с — практически равномерный. Средняя скорость частиц с увеличением v_b уменьшается.

Ранее было отмечено, что решение исходных уравнений с допущением $\psi = \sqrt{(1 + \dot{x}/v)^2 + (\dot{y}/2)^2} = \psi_{cp} = 1,06 = \text{const}$ позволяет получить достаточно точные для практических целей аналитические зависимости для скорости и перемещения частиц, выделяе-

мых в нижней части канала. В таблице 16 (в числителе) приведены эти значения для частицы с $K = 0,12$ м⁻¹ при $\alpha = 40^\circ$, $C_0 = 0,3$ м/с и скорости воздушного потока $v_b = 4, 5, 6, 7, 8$ м/с.

Как видно из данных таблицы 16, аналитические зависимости (375—378) позволяют с достаточно высокой степенью точности определить перемещения и скорости зерновки в пневмосепарирующем канале. Наибольшие расхождения этих данных с результатами решения исходных уравнений на ЭВМ (в знаменателе) характерны для конечной стадии процесса сепарирования, однако и они не превышают $2-3\%$.

Воздушный поток замедляет движение зерновок, это особенно проявляется на режимах с высокими скоростями воздушного потока ($v_b = 8,0-9,0$ м/с), где характер движения зерновок приближается к равномерному ($C = \text{const}$), а на режиме $v_b = 9,0$ м/с движение зерновки уже равнозамедленное.

Для оценки сходимости результатов теоретических и экспериментальных исследований построили траектории зерновок и частиц примесей по данным решения исходных уравнений на ЭВМ и результатам эксперимента методом киносъемки одиночных частиц (по средним траекториям). Сравнение проверили для режимов сепарирования при $v_b = 5,0-8,0$ м/с, углах ввода α , равных 0° и 40° , зерновок и частиц примесей пшеницы Гиза 144, Безенчукская 98 и аэродинамически легких примесей (средненатурных).

Учитывая, что при теоретических исследованиях для зерновок и частиц примесей значения коэффициентов пропорциональности силы аэродинамического сопротивления K приняты с условием охвата большого количества частиц, весьма разнообразных по аэродинамическим свойствам, для сравнения выбирали траектории зерновок, наиболее близких по коэффициенту K подопытным частицам.

На рисунках 65 и 66 приведены траектории зерновок и частиц примесей по данным теории (Т) и эксперимента (Э). Здесь значения K для зерновок практически совпадают: при теоретических исследованиях $K = 0,12$, в эксперименте $K = 0,1$ (зерновки пшеницы Гиза 144) и $K = 0,12$ (зерновки пшеницы Безенчукская 98).

Для примесей значения K несколько отличаются: $K = 1,1$ (теоретические исследования), $K = 0,96$ (эксперимент). Это объясняется сложностью выбора частиц примесей с определенным значением K в связи с тем, что аэродинамические свойства частиц в массе примесей значительно колеблются.

При угле ввода $\alpha = 40^\circ$ (кривые 1, 2, 3, рис. 65, а) результаты теории и эксперимента совпадают удовлетворительно, а размещение траекторий соответствует установленным закономерностям. Расположение траекторий зерновок пшеницы Безенчукская 98 над траекториями зерновок пшеницы Гиза 144 объясняется большим значением K для первого продукта. Расхождение значений перемещений не превышает 10% , что можно считать вполне удовлетворительным для опытов с одиночными частицами, затрудняющи-

Таблица 15. Значение средних скоростей зерновок в пневмосепарирующем канале при $C_0=0,8$ м/с. $\alpha=40^\circ$, $K=0,12$ м⁻¹ и $v_B=5, 6, 7$ и 8 м/с

Положение зерновки в канале	5 м/с		6 м/с		7 м/с		8 м/с	
	x	y	x	y	x	y	x	y
	C_0		C_0		C_0		C_0	
Начало процесса, $t=0$	0,514	0,613	0,514	0,613	0,514	0,613	0,514	0,613
Середина процесса, $t=0,1$ с	1,088	0,571	0,948	0,565	0,789	0,558	0,612	0,552
Конец процесса, $t=0,2$ с	1,584	0,529	1,316	0,518	1,018	0,508	0,693	0,498
Средняя скорость перемещения зерна C_{cp}	1,33		1,11		0,96		0,826	

Таблица 16. Значение перемещений и скоростей зерновки ($K=0,12$ м⁻¹) в пневмосепарирующем канале при $C_0=0,3$ м/с, $\alpha=40^\circ$, $\psi_{cp}=1,06$ и $v_B=4, 5, 6, 7$ и 8 м/с

Положение зерновки в канале по времени, с	4 м/с		5 м/с		6 м/с		7 м/с		8 м/с	
	x	y								
	$C, \text{ м/с}$		$C, \text{ м/с}$		$C, \text{ м/с}$		$C, \text{ м/с}$		$C, \text{ м/с}$	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,05	19,2	11,3	17,7	11,3	15,9	11,3	14,0	11,2	11,7	11,2
0,10	56,5	22,2	50,7	22,2	44,0	22,1	36,2	22,0	27,5	21,9
0,15	111,0	33,2	98,3	32,8	83,2	32,5	66,0	32,3	46,8	32,0
0,20	181,0	43,4	159,0	43,0	132,7	42,5	102,7	42,1	69,4	41,7
	187,0	43,7	163,4	43,2	135,3	42,6	102,8	42,1	66,1	41,6

Примечание. В числителе указаны данные при аналитическом решении уравнений с допущением $\psi = \sqrt{(1+x/v)^2 + (y/v)^2} = \psi_{cp} = 1,06$.

ми постановку эксперимента с высокой точностью и особенно на частицах примесей. Для траекторий зерновок с углом ввода $\alpha = 0^\circ$ (см. рис. 65, а) экспериментальные данные хорошо укладываются в диапазон траекторий, построенных по теоретическим данным с интервалом начальной скорости ввода зерновок $C_0 = 0,3—0,8$ м/с, однако расположение траекторий в средней части свидетельствует о том, что средняя начальная скорость зерновки, зафиксированная в опытах в пределах $0,6—0,8$ м/с, ближе к нижнему пределу. Обеспечить подачу зерновки или частицы примесей в канал с высокой точностью по начальной скорости ввода очень трудно в связи с небольшой их массой и самой разнообразной геометрией. Многочисленные измерения C_0 привели к выводу о том, что можно гарантировать в опытах только диапазон скоростей ввода, например $0,4—0,6$ м/с или $0,6—0,8$ м/с и т. д. Поэтому для более точного сравнения данных теории и эксперимента дополнительно построены траектории по аналитическим (А)

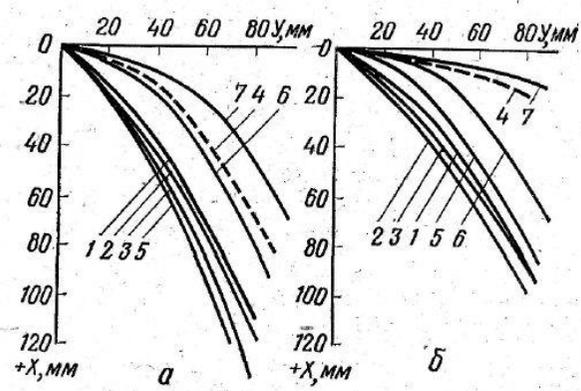


Рис. 65. Траектории зерновок в пневмосепарирующем канале по данным теоретических (Т) и экспериментальных (Э) исследований и аналитических (А) зависимостей ($K, \text{ м}^{-1}$; $C_0, \text{ м/с}$; $\alpha, \text{ град}$): а — при $v_B=5$ м/с; б — при $v_B=8$ м/с; 1 — $K=0,12, C_0=0,6—0,8, \alpha=40$ (Э); 2 — $K=0,1, C_0=0,6—0,8, \alpha=40$ (Э); 3 — $K=0,12, C_0=0,8, \alpha=40$ (Т); 4 — $K=0,12, C_0=0,6, \alpha=0$ (А); 5 — $K=0,12, C_0=0,3, \alpha=0$ (Т); 6 — $K=0,12, C_0=0,6—0,8, \alpha=0$ (Э); 7 — $K=0,12, C_0=0,8, \alpha=0$ (Т).

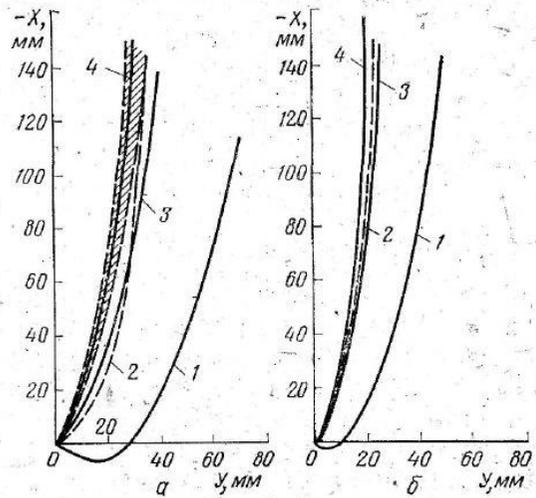


Рис. 66. Траектории частиц примесей в пневмосепарирующем канале по данным теоретических (Т) и экспериментальных (Э) исследований и аналитических (А) зависимостей при $\alpha=40^\circ$ ($K, \text{ м}^{-1}$; $C_0, \text{ м/с}$): а — при $v_B=5$ м/с; б — при $v_B=7$ м/с; 1 — $K=1,1, C_0=0,8$ (Э); 2 — $K=0,96, C_0=0,4$ (А); 3 — $K=0,96, C_0=0,4—0,6$ (Э); 4 — $K=1,1, C_0=0,3$ (Т).

зависимостям (на рисунке показаны пунктирными линиями), позволяющие получить более полное представление о сходимости данных теории и эксперимента.

Например, при угле ввода $\alpha = 0^\circ$ и скорости $C_0 = 0,6$ м/с (рис. 65, б) траектории зерновок с $K = 0,12$ м⁻¹ по значениям суммарного перемещения различаются не более чем на 5—10%. Анализ траекторий частиц примесей, по данным теории и эксперимента (рис. 66), несмотря на некоторые отличия коэффициентов K , позволяет сделать вывод об удовлетворительной сходимости теоретических исследований с опытными данными.

Если предположить (рис. 66, а) увеличение коэффициента K от 0,96 до 1,1 м⁻¹ и уменьшение скорости C_0 от 0,4—0,6 до 0,3 м/с при $v_b = 5$ м/с, то в соответствии с общими изученными закономерностями перемещения частиц в канале траектория, построенная по экспериментальным данным, будет иметь более крутое восхождение и займет положение в заштрихованном диапазоне. «Экспериментальные» траектории при $v_b = 7$ м/с и $K = 0,96$ м⁻¹ (рис. 66, б) еще ближе к «теоретическим» данным, и корректировка их приближением параметров частиц дает более высокий результат сходимости. Таким образом, вполне можно гарантировать точность теоретических исследований перемещения зерновок в пределах 5—10%, что достаточно для того, чтобы по построенным траекториям оценить условия для сепарирования и установить оптимальные углы и начальные скорости ввода зерновой смеси в канал. Траектории (см. рис. 66), построенные по аналитическим зависимостям (377, 378), хорошо сходятся с данными эксперимента (расхождение не превышает 3%). Следовательно, целесообразно в практике использовать аналитические зависимости и для частиц, уносимых воздушным потоком, несмотря на большие колебания коэффициента ψ , принятого при интегрировании постоянным.

Значение коэффициента ψ для частиц, уносимых воздушным потоком, как показал анализ выражения $\sqrt{\left(1 + \frac{x}{v}\right)^2 + \left(\frac{y}{v}\right)^2}$,

при различных режимах сепарирования, как правило, меньше, чем для зерновок, поэтому для частиц с коэффициентом $K = 1,0$ м⁻¹ целесообразно в зависимостях (375—378) принимать значения $\psi = 0,8—1,0$, что позволит получить более точные результаты. Установив удовлетворительную сходимость данных теоретических исследований и эксперимента, рассмотрим дополнительно некоторые закономерности перемещения частиц в канале с учетом экспериментальных наблюдений.

Вопреки ожиданиям и распространенному среди исследователей мнению о том, что при различных скоростях восходящего воздушного потока зерновки будут двигаться по существенно отличающимся траекториям, результаты исследований показывают не такое значительное изменение средних траекторий, хотя минимальная средняя скорость воздушного потока $v_b = 3,0$ м/с в 2,67 раза

была меньше максимальной в первой серии опытов, и она колебалась от 0 до 8,0 м/с — во второй. Отмечена тенденция некоторого подъема траектории зерновки, т. е. ее более пологий характер с увеличением скорости воздушного потока, что вполне соответствует физической картине процесса. В пределах практических режимов сепарирования ($v_b = 4,0—6,0$ м/с) расхождение (Δ) средних траекторий на удаление по координате $+X = 120$ мм составляет не более 8—12 мм, а на выходе из канала при $H_2 = (1,5—2,0)$ В $\Delta = 10—20$ мм.

Таким образом, повышение средней скорости воздушного потока в канале незначительно изменяет траекторию зерновки и не имеет решающего значения в выборе геометрических размеров канала. Его можно учитывать наряду с другими факторами (повышенной удельной нагрузкой и другими) при выборе ширины канала B на высоких режимах сепарирования, например при первой операции пневмосепарирования в зерноочистительных агрегатах (ширина зоны сепарирования увеличится).

Что касается частиц примесей, то их средние траектории тоже мало зависят от режимов сепарирования. В то же время пучок траекторий для того или иного режима сепарирования более разбросан по сечению канала, что объясняется низкой выравниваемостью частиц примесей по скоростям витания, небольшим их абсолютным значением и крайне разнообразной формой. Учитывая малую концентрацию аэродинамически легких примесей в зерновой массе не более 5—6%, широкий диапазон траекторий частиц легких примесей по сечению канала не может вызвать увеличения зоны сепарирования, в том числе по ширине канала.

Для определения абсолютных скоростей зерновок в канале из пучков траекторий выбирали траектории, наиболее соответствующие средним. На них наносили положения зерновок, зафиксированные на киноленте. Значение скоростей определяли на отрезках траектории между соседними положениями частиц. Результаты вычислений показали, что скорости зерновок на отдельных участках траекторий в пределах высоты нижней части канала (H_2) изменяются незначительно, однако характер движения остается равноускоренным. При значениях $v_b = 8—9$ м/с движение зерновок в канале близко к равномерному, т. е. $C = \text{const}$. Одновременно значения средних скоростей зерновок в канале для разных режимов сепарирования неодинаковы. Здесь достаточно четко проявляется закономерность уменьшения скорости зерновки с увеличением средней скорости воздушного потока, причем зависимость носит линейный характер (рис. 67). Например, при увеличении v_b в канале от 3 до 8 м/с скорость зерновки уменьшается от 1,51 до 0,77 м/с, т. е. почти вдвое. Результаты опытов хорошо согласуются с данными теоретических исследований. Скорости частиц примесей в канале, как показала обработка результатов измерений, быстро достигают значения $v_{\text{ч}} = v_b - v_{\text{вт}}$ и далее движутся с постоянной скоростью. Так, частицы примесей с $v_{\text{вт}} = 3,0$ м/с при

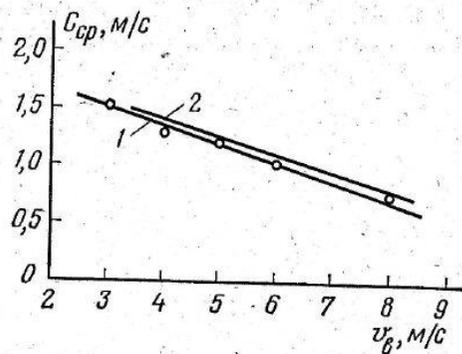


Рис. 67. Кривые зависимости средней скорости зерновки в канале от скорости воздушного потока ($\alpha=40^\circ$, $K=0,12 \text{ м}^{-1}$):

1 — экспериментальная, $C_0=0,6-0,8 \text{ м/с}$; 2 — расчетная, $C_0=0,8 \text{ м/с}$.

смени в канал и воздушные режимы сепарирования изменяли в широких пределах, охватывающих все области практически применяемых режимов и конструктивно установочных параметров пневмосепарирующих устройств.

Для сравнения траектории, полученные в результате теоретических исследований одиночных частиц легкого и тяжелого компонентов, были наложены в соответствующем масштабе на кривые массового потока при сепарировании в реальных условиях (рис. 68). В учет принимали состав сепарируемой смеси по вариационным таблицам аэродинамических свойств зерновок и частиц примесей и идентичность условий эксперимента. Процесс протекал при удельной нагрузке $q = 100 \text{ кг/(см} \cdot \text{ч)}$, $\alpha = 0^\circ$ и 40° , $C_0 = 0,3-0,6 \text{ м/с}$, $v_b = 5 \text{ м/с}$. Зерновки пшеницы характеризовались коэффициентом $K_3 = 0,07-0,3 \text{ м}^{-1}$; средневзвешенное значение $K_3 = 0,12 \text{ м}^{-1}$. Частицы примеси характеризовались коэффициентом $K_{шр} = 1,35 \text{ м}^{-1}$. В теоретических исследованиях условные зерновки и частицы примеси наделяли следующими предельными характеристиками: $K_3 = 0,05-0,25 \text{ м}^{-1}$ и $K_{шр} = 0,2-9,8 \text{ м}^{-1}$, достаточно близкими к характеристикам подопытных продуктов. Значение $K_{шр} = 38 \text{ м}^{-1}$ характеризует наличие в смеси частиц примесей с $v_{вт} < 0,5 \text{ м/с}$, содержание которых незначительно, а отделение не представляет трудности. Поэтому в теоретических исследованиях коэффициент K для частиц примесей ограничен значением $9,8 \text{ м}^{-1}$, т. е. предельное значение частиц по скорости витания принято 1 м/с .

Траектории на фотографии процесса нанесены по средним, а в ряде случаев — по предельным характеристикам, причем при всех параметрах, равных данным эксперимента, начальная скорость C_0 входа частиц в канал принята следующей: для частиц с наименьшим удалением по оси Y $C_0 = 0,3 \text{ м/с}$, а с наибольшим

рабочих режимах достигают равномерного установившегося движения на высоте канала от зоны сепарирования, как правило, не более $1,5 B$.

Для сравнения траекторий и скоростей зерновок и частиц примесей, а также других параметров при рассмотрении процесса пневмосепарирования как разделения небольшого количества одиночных частиц с реальным процессом, т. е. массовым потоком, провели серию лабораторных опытов при нагрузке на канал 100 и $150 \text{ кг/(см} \cdot \text{ч)}$. Начальные условия ввода зерновой

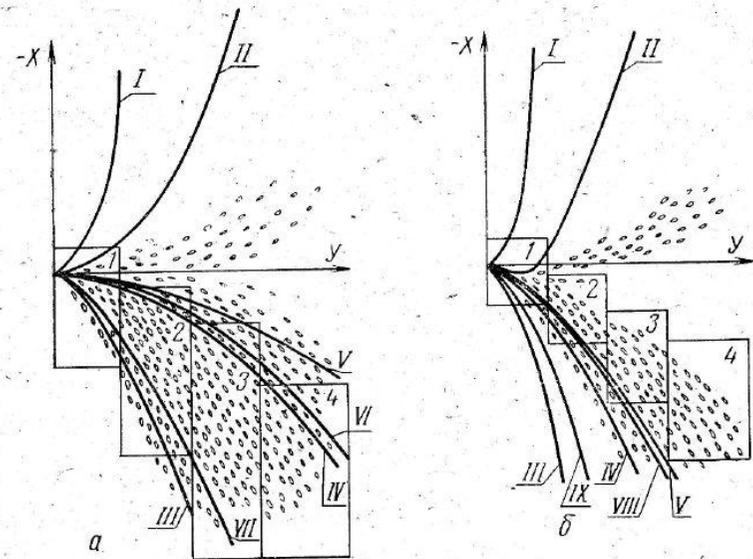


Рис. 68. Процесс пневмосепарирования в вертикальном канале $q=100 \text{ кг/(см} \cdot \text{ч)}$, $v_b = 5 \text{ м/с}$ и траектории зерновок и частиц примесей по данным теоретических исследований (K , м^{-1} ; C_0 , м/с ; v_b , м/с):

a — при $\alpha=0$; $б$ — при $\alpha=40^\circ$; I — $K=1,1$, $C_0=0,3$; II — $K=1,1$, $C_0=0,8$; III — $K=0,12$, $C_0=0,3$; IV — $K=0,12$, $C_0=0,8$; V — $K=0,25$, $C_0=0,8$; VI — $K=0,12$, $C_0=0,8$, $v_b=6,5$; VII — $K=0,12$, $C_0=0,3$, $v_b=6,5$; VIII — $K=0,12$, $C_0=0,8$, $v_b=7,5$; IX — $K=0,12$, $C_0=0,3$, $v_b=7,5$; 1, 2, 3, 4 — зоны в канале к расчету скорости в межзерновом пространстве.

удалением $C_0 = 0,8 \text{ м/с}$, т. е. охвачен предельный диапазон разброса траектории частиц.

Траектории наиболее тяжелых примесей ($K = 0,2 \text{ м}^{-1}$) на рисунке 68 не показаны, поскольку при скорости $5,0 \text{ м/с}$ последние воздушным потоком не отделяются и перекрываются по аэродинамическим свойствам зерновками с $K = 0,25 \text{ м}^{-1}$, траектории которых приведены.

Сравнение данных теории и эксперимента над одиночными частицами с результатами опытов над массовым потоком показывает, что траектории зерновок и частиц примесей при одинаковых средних скоростях воздушного потока и других условиях сепарирования различаются, и это различие увеличивается с повышением режима сепарирования. Так, при изменении v_b от 0 до $3,5 \text{ м/с}$ различие траекторий незначительно, а в области режимов с $v_b = 4,0-8,0 \text{ м/с}$ оно очевидно.

Общая тенденция изменения траекторий выражается приобретением ими более пологого характера, т. е. «приподниманием» потока частиц, выпадающих в канал. Это объясняется стеснением воздушного потока в канале, уменьшением «живого сечения» канала, увеличением скорости воздуха в межзерновом пространстве. В результате проявляется та же закономерность, что и в опытах с одиночными частицами: увеличение v_b приподнимает частицу

на пути ее в канале, делает траекторию более пологой. При анализе фотографий процесса сепарирования было установлено, что зона сепарирования сравнительно разрежена, а зерновки, выпадающие в канал, сходят довольно плотным потоком по стенке канала, противоположной входу продукта. При этом, если на скоростях до 3,0—3,5 м/с они достигают стенки и концентрируются плотным потоком по координате $+X \gg B$, то на скоростях более 4,0 м/с поток концентрируется при $+X \simeq 0,5 B$ и менее. Это уменьшает высоту зоны сепарирования и свидетельствует о предпочтительности более широких каналов на высоких режимах сепарирования, что, в частности, и было реализовано на машинах для первой операции пневмосепарирования зерна и семян подсолнечника в установках типа АЗС и КЛОМ.

Характер траекторий аэродинамически легких примесей, установленный из анализа фотографий процессов разделения в массовом потоке при режимах $v_{вт} = 5,0—8,0$ м/с, аналогичен характеру траекторий одиночных частиц примесей. Здесь были зафиксированы также пучки более широкого диапазона, занимающие $\frac{2}{3}—\frac{3}{4}$ сечения канала и смещенные к стенке, противоположной входу сепарируемой смеси. Более близкий характер траекторий одиночных частиц примесей и примесей в реальном массовом потоке объясняется незначительной концентрацией последних (3—4%) в сепарируемой смеси и в последующем в канале, что обеспечивает стабильность воздушного потока и соответственно перемещение транспортируемой частицы.

На фотографиях процесса наиболее хорошо видны частицы примесей с большими скоростями витания, траектории которых расположены ближе к стенке канала, противоположной входу сепарируемой смеси. Частицы с $v_{вт} < 1,0$ м/с наиболее легко выделяются и быстро уносятся воздушным потоком по крутым восходящим траекториям. Количество их невелико, скорость транспортирования большая.

Анализ процесса пневмосепарирования при различных углах ввода сепарируемой смеси показывает, что при $\alpha = 40^\circ$ зерновки в канале движутся более плотной струей, а при $\alpha = 0^\circ$ зерновая смесь сильнее «разбрызгивается»: нижние слои ее на горизонтальном участке направляющей плоскости тормозятся (видны отдельные зерновки), а верхние имеют большую скорость (видны следы зерновок). Как следствие этого траектории частиц верхних слоев сепарируемой смеси при угле ввода $\alpha = 0^\circ$ при всех значениях v_b выше.

Только различием начальных скоростей частиц по толщине слоя можно объяснить более крутые падающие траектории частиц, находящихся в нижних слоях.

Из сказанного делаем вывод о том, что более интенсивное «разбрызгивание» сепарируемой смеси в канале наряду с ориентацией направляющей потока ($\alpha = 0^\circ$) происходит из-за различия

скоростей частиц в слоях в результате большего торможения нижнего слоя при поступлении потока продукта на горизонтальную направляющую. Кроме того, траектории частиц сепарируемой смеси с увеличением удельной нагрузки и постоянной средней скорости воздушного потока v_b , а следовательно с неизменным расходом воздуха, располагаются выше, так как возрастает скорость воздуха в межзерновом пространстве.

Траектории, построенные по данным теоретических исследований для наиболее распространенных режимов сепарирования ($v_b = 5,0—6,0$ м/с), круче, чем траектории зерновок в эксперименте.

Сходимость теоретических данных с экспериментальными по траекториям одиночных частиц и потока в условиях сепарирования при угле ввода смеси $\alpha = 0^\circ$ значительно выше, чем при угле $\alpha = 40^\circ$. Это объясняется существенным «разбрызгиванием» потока при горизонтальном его вводе, в результате чего плотность потока уменьшается, взаимодействие частиц в нем ослабевает, и условия его движения становятся ближе к условиям независимого движения нескольких одиночных частиц, для которых описаны и решены дифференциальные уравнения. Наоборот, для угла ввода $\alpha = 40^\circ$ плотность потока выше, и только у противоположной стенки канала он несколько разрыхляется. Здесь взаимодействие частиц в потоке играет большую роль, в результате чего их движение, кроме начальных параметров ввода и режимов сепарирования, определяется также условиями перемещения частиц в потоке продукта. Из рисунка 68 видно, что из разрыхленного потока больше выделяется легких примесей. При одних и тех же воздушных режимах примеси намного раньше вырываются воздухом из потока продукта, в результате чего и траектории *II* частиц примесей (см. рис. 68, *a*), по данным теоретических исследований, ближе фактическому перемещению частиц легкого компонента.

Если при угле ввода $\alpha = 40^\circ$ траектории зерновок и примесей для всех случаев ввода смеси и условий ее сепарирования с учетом разнообразия частиц совпадают с предельными положениями пучка траектории частиц в потоке и далее зерновки, как и частицы легких примесей, имеют более крутые траектории (первые — падающие, а вторые — восходящие), то при угле $\alpha = 0^\circ$ траектории частиц с теми же параметрами накладываются на пучок траекторий частиц в массовом потоке.

Например, при $v_b = 5$ м/с (см. рис. 68, *b*) и угле $\alpha = 40^\circ$ зерновой поток и уносимые воздушным потоком примеси в основном ограничиваются траекториями *IV* и *II*, а траектории соответственно *III* и *I* ограничивают уже не только отдельные частицы наиболее тяжелых *III* и легких *I* фракций, перемещающихся вне основного потока. При угле $\alpha = 0^\circ$ (см. рис. 68, *a*) и прочих равных условиях зерновой поток располагается между траекториями *III* и *IV*, а траектория *II* совпадает со следами частиц примесей, у которых восходящая траектория круче. Более общий характер

траекторий частиц примесей при угле $\alpha = 0^\circ$ и 40° в отличие от зерновок объясняется небольшой концентрацией их в воздушном потоке.

Экспериментальные наблюдения процесса сепарирования с массовым потоком показали, что с уменьшением удельной нагрузки на канал крутизна траекторий зерновок и частиц примесей увеличивается. Это приближает процесс к сепарированию в канале небольшого количества одиночных частиц тяжелого и легкого компонентов.

Сравнение опытных данных процесса массового потока с результатами теоретических исследований показывает, что отдельные факторы и условия реального процесса сепарирования по-разному влияют на степень сходимости данных теории и эксперимента. Например, при угле ввода сепарируемой смеси $\alpha = 0^\circ$ процесс сепарирования в большей степени приближается к теоретически установленным закономерностям, уменьшение удельной нагрузки, как и увеличение начальной скорости C_0 , также повышает связь опытных и теоретических данных. Поэтому установление общих корреляционных зависимостей сходимости данных с учетом многообразия сепарируемых частиц, режимов и параметров сепарирования усложнено.

В общем случае на изменение траекторий частиц в массовом потоке по сравнению с траекториями небольшого количества одиночных частиц влияет уплотнение частиц и их взаимодействие при перемещении в канале. Решающее значение имеет состояние потока на входе в канал: чем больше плотность потока в этой зоне, тем выше скорости воздуха в межзерновом пространстве, в результате чего поток зерновок несколько приподнимается, что и определяет более пологую траекторию его в канале.

На основе теоретических и экспериментальных данных были определены скорости воздуха в межзерновом пространстве по зонам канала в соответствии с плотностью потока. На рисунке 68 эти зоны приведены для режима сепарирования $v_b = 5$ м/с, $q = 100$ кг/(см·ч) и углов ввода сепарируемой смеси $\alpha = 0^\circ$ и 40° . Принято, что воздушный поток выравнен по сечению канала, время пересечения канала потоком продукта составляет 0,3 с, а начальная скорость его входа $C_0 = 0,4$ м/с.

Время процесса, или промежуток времени, за которое основной поток зерновок пересекает канал ($B = 130$ мм), как это установлено исследованиями, в области основных параметров канала и режимов сепарирования составляет 0,2—0,5 с. Время процесса $t_n = 0,3$ с, выбранное по зонам с учетом изменения скорости и пути потока, примерно составит $t_{n1} = 0,1$ с; $t_{n2} = 0,08$ с; $t_{n3} = 0,06$ с и $t_{n4} = 0,06$ с.

Методика подсчета скорости в межзерновом пространстве базируется на зависимости, установленной Дюпуй

$$v_{м.з} = \frac{v_{в.сп}}{m}, \quad (382)$$

где $v_{в.сп}$ — средняя скорость воздушного потока, м/с; $m = \frac{V - nV_3}{V}$ — поправочный коэффициент; V — объем зоны, см³; n — число зерновок в объеме зоны, шт.; V_3 — средний объем зерновки, см³.

В нашем случае объем зерновок в той или иной зоне, отнесенной к 1 см ширины канала, вычисляли как

$$nV_3 = \frac{qt_n}{\rho}, \quad (383)$$

где q — удельная нагрузка, кг/с; t_n — время процесса, с; $\rho \approx 1,38$ — плотность зерновки, г/см³ (табл. 17).

Т а б л и ц а 17. Значение скоростей воздушного потока в межзерновом пространстве в опытах с массовым потоком при $v_b = 5$ м/с, $q = 100$ кг/(см·ч), $\alpha = 0^\circ$ и 40° , $B = 130$ мм и $t_n = 0,3$ с

Углы ввода α , град	Зоны канала (см. рис. 68)	Размеры зоны канала, мм	Объем зоны V , см ³	Объем зерновок nV_3 , см ³	Время процесса t_n , с	Коэффициент заполнения объема K_3	Коэффициент m	Удельная нагрузка q , кг/с	Средняя скорость воздуха в канале $v_{в.сп}$, м/с	Скорость воздуха в межзерновом пространстве $v_{м.з}$, м/с
0	1	30×54×10	16,2	2,03	0,10	0,8	0,77	0,028	5,0	6,50
	2	30×74×10	22,2	1,75	0,08	0,8	0,90	0,028	5,0	5,60
	3	30×108×10	32,4	1,24	0,06	0,7	0,94	0,028	5,0	5,30
	4	40×120×10	48,0	1,24	0,06	0,7	0,96	0,028	5,0	5,20
	Среднее значение	—	—	—	—	—	—	0,280	5,0	5,65
40	1	30×34×10	10,2	2,03	0,10	0,6	0,67	0,280	5,0	7,50
	2	30×35×10	10,5	1,75	0,08	0,6	0,72	0,280	5,0	7,00
	3	30×45×10	13,5	1,24	0,06	0,7	0,88	0,280	5,0	5,70
	4	30×61×10	18,3	1,24	0,06	0,7	0,92	0,280	5,0	5,40
	Среднее значение	—	—	—	—	—	—	0,280	5,0	6,40

Как видно из рисунка 68, расчетная зона частично заполнена потоком зерновок и в разной степени для отдельных зон и условий сепарирования, поэтому в формулу для определения коэффициента m введен коэффициент заполнения объема расчетной зоны K_3 , определяемой по кривым процесса сепарирования. Следует отметить, что коэффициент K_3 для условий сепарирования при $\alpha = 0$ имеет более высокое значение благодаря разбрызгиванию потока. Зависимость для коэффициента m будет такой:

$$m_3 = (K_3V - nV_3)/K_3V.$$

Результаты расчетов для режима сепарирования $v_B = 5$ м/с сведены в таблицу 17.

С учетом полученных опытных данных приведены откорректированные траектории для наиболее характерных продуктов и режимов сепарирования ($K = 0,12$, $C_0 = 0,3-0,8$ м/с) с поправкой на повышение скорости воздуха в межзерновом пространстве в первой зоне канала (траектории VI, VII, VIII и IX). Эти траектории для угла ввода $\alpha = 0^\circ$ не выходят за пределы профиля потока, и, если траектория VI ограничивает верхнюю часть профиля, то траектория VII смещается к центру потока, удаляясь от его нижней границы, формируемой из частиц с меньшим значением коэффициента K , т. е. более высокими скоростями витания. Откорректированные траектории меньше отличаются от основных и при широком пучке, какой бывает при угле $\alpha = 0^\circ$, укладываются в диапазон траекторий III—V, построенных по данным теоретических исследований.

Можно сделать вывод о том, что профиль потока зерновок, построенный по откорректированным траекториям при угле $\alpha = 0^\circ$, средних значениях коэффициента K и начальных скоростях входа сепарируемой смеси 0,3—0,8 м/с достаточно точно соответствует реальному процессу. С увеличением угла ввода сепарируемой смеси сходимость траекторий, в том числе с учетом повышения скорости воздуха в межзерновом пространстве, с профилем потока в реальных условиях сепарирования уменьшается, и при угле $\alpha = 40^\circ$ эти траектории ограничивают нижнюю часть профиля потока.

Характер траекторий частиц примесей более общий, он мало зависит от угла ввода сепарируемой смеси, в то же время траектории частиц со средними значениями коэффициента K круче, чем у частиц той же аэродинамики в реальных условиях сепарирования.

Теоретические траектории при угле $\alpha = 40^\circ$ ограничивают профиль потока частиц примесей в зоне наиболее крутовосходящих траекторий.

Это объясняется тем, что выделение аэродинамически легких частиц из основного потока в результате взаимодействия частиц основной культуры и примесей затруднено. Действие воздушного потока в канале на одиночную частицу начинается с момента ее ввода в канал; при массовом поступлении поток захватывает частицу несколько позже. В результате траектория ее смещается к стенке, противоположной входу сепарируемой смеси, что хорошо видно на рисунке 68.

Закономерности, установленные сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяют при известных аэродинамических свойствах зерновок и примесей, выбранных параметрах и режимах сепарирования воспроизвести в первом приближении процесс их разделения, определив пучки траекторий частиц тяжелого и легкого компонента, и оценить эф-

фективность условий сепарирования. Одновременно установлены оптимальные параметры пневмосепарирующих устройств, главным образом по углу ввода сепарируемой смеси, проверенные на экспериментальных установках и в производственных условиях при сепарировании семян зерновых, масличных и крупяных культур.

Во всех сериях опытов с массовым потоком проводили контрольные опыты по оценке эффективности процесса сепарирования, которые позволяли устанавливать степень приближения опыта к реальному процессу и одновременно узнавать влияние отдельных факторов на эффективность процесса.

§ 2. Зависимость эффективности процесса пневмосепарирования от различных факторов

Изучение многочисленных конструкций пневмосепарирующих машин и устройств наряду с теоретическими предпосылками к процессу пневмосепарирования дали возможность определить основные параметры режимов сепарирования и конструктивные особенности машин, наиболее существенно влияющих на технологическую эффективность процесса. Кроме того, эффективность процесса в большой степени зависит от физико-механических свойств разделяемых компонентов и их количественного соотношения.

В общем случае математическая модель пневмосепарирования представляется функцией с достаточно большим числом переменных факторов

$$E = f(q, v_B, K_3, K_{пр}, \omega, A, \Phi_B, K_H, C_0, \alpha, H_1, H_2, B, \psi_p, K_K), \quad (384)$$

где ω — относительная влажность сепарируемой смеси; Φ_B — коэффициент вариации поля скоростей воздушного потока; H_1 и H_2 — высота соответственно верхней и нижней части канала; ψ_p — коэффициент, характеризующий влияние степени расслоения сепарируемой смеси перед подачей ее в канал на эффективность сепарирования; K_K — коэффициент конструктивного решения и формы канала, определяемый его геометрией и способом подвода воздуха в канал; K_H — коэффициент неравномерности распределения потока по ширине канала.

Наибольшее влияние на эффективность сепарирования оказывают:

- удельная нагрузка на канал q ;
- средняя скорость воздушного потока v_B ;
- выравненность воздушного потока Φ_B ;
- физико-механические свойства компонентов сепарируемой смеси и степень ее засоренности ($K_3, K_{пр}, \omega, A$);
- размеры и конструктивное решение пневмосепарирующих каналов (B, H_1, H_2, K_K);
- начальная скорость и условия ввода сепарируемой смеси в пневмосепарирующий канал (C_0, α) и другие.

Закономерности влияния основных факторов на эффективность процесса, принятую в качестве критерия оптимизации при нормативной четкости сепарирования ($a = 2\%$), были выведены в ходе экспериментальных исследований и производственных испытаний пневмосепарирующих устройств методами однофакторного и многофакторного планирования экспериментов.

Цель исследований процесса пневмосепарирования с использованием методов многофакторного планирования эксперимента и регрессионного анализа — это обоснование простой модели процесса, связывающей его эффективность с наиболее важными факторами, изменяемыми в сравнительно небольшом диапазоне, и необходимыми для расчета и конструирования основного узла этого типа устройств — вертикального пневмосепарирующего канала. Выбор основных факторов, вводимых в модель, основывался на теоретических исследованиях процесса и данных однофакторных лабораторных и экспериментальных наблюдений.

Для построения модели процесса в первом варианте отобрано шесть факторов, которые изменяли в следующих пределах: удельную нагрузку q от 50 до 200 кг/(см·ч), скорость воздушного потока v_v от 4 до 7 м/с, коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления частиц примесей $K_{пр}$ от 96 до 2,06 м⁻¹, начальную скорость ввода сепарируемой смеси C_0 от 0,2 до 0,8 м/с, угол ввода α от 0 до 40° и ширину канала B от 130 до 200 мм.

В качестве критерия оптимизации принята эффективность сепарирования E , выраженная в долях единицы и обозначенная η , при нормативной четкости сепарирования. Постоянные параметры процесса при этом характеризовались следующим образом. Аэродинамически легких примесей A содержалось 3—4%, что характерно для первых операций пневмосепарирования в период послеуборочной обработки зерна. Коэффициент пропорциональности силы аэродинамического сопротивления зерновок пшеницы K_z колебался от 0,1 до 0,12 м⁻¹, т. е. существенно меньше, чем содержание частиц примесей. Коэффициент вариации поля скоростей воздушного потока $\Phi_v = 15—20\%$ зафиксирован при многочисленных исследованиях и производственных испытаниях пневмосепарирующих устройств комплектных зерноперерабатывающих установок.

Коэффициент неравномерности распределения зерна по приемному фронту $K_{н} = 0,050—0,075$ обеспечивал достаточно эффективное ведение процесса. Получали его на приемно-распределительных устройствах вибрлоткового типа либо на устройствах с двухклапанным механизмом, распространенным в комплектных установках.

Коэффициент K_k конструктивного решения и формы канала определялся геометрией канала и способом подвода воздуха для сепарирования. В работе принимали прямоугольный канал постоянного сечения по высоте с подводом воздуха со стороны

поступления зерна и частично через нижнюю часть канала. Размеры канала по высоте были такими: $H_1 \geq 800$ мм и $H_2 \approx 1,5 B$. Коэффициент ψ_p , характеризующий влияние степени расслоения сепарируемой смеси перед подачей ее в канал на эффективность сепарирования, при исследованиях не учитывали, поскольку в производственной практике устройства, обеспечивающие этот процесс, еще не применяют. Предполагалось равномерное распределение примесей по поперечному сечению потока сепарируемой смеси.

Для реализации эксперимента ПФЭ $N = 2^6$ и построения линейной модели было проведено 64 опыта при всех сочетаниях нижнего и верхнего уровней факторов с трехкратной повторностью опытов.

Обработку результатов полного факторного эксперимента проводили на ЭВМ «Минск-22М». Уравнения регрессии получались громоздкие, неудобные для практического использования, поэтому для обоснованного снижения уровня полнофакторного эксперимента еще раз были проанализированы значимость факторов, вводимых в модель, и их возможное влияние на другие параметры процесса.

Исследования многих пневмосепарирующих устройств с каналами разного типа при сепарировании достаточно разнообразных культур (пшеницы, семян подсолнечника, гречихи, проса) показали, что оптимальный угол ввода сепарируемой смеси находится в области 0°. Оптимальная начальная скорость ввода сепарируемых смесей C_0 при столь же разнообразных факторах составляет 0,2—0,4 м/с.

Производственная проверка подтвердила оптимальность выбранных параметров.

Правоммерно считать, что эти параметры вряд ли нуждаются в дальнейшей оптимизации в условиях сепарирования зерна в вертикальных каналах.

Для характеристики аэродинамически легких примесей принято среднее значение $K_{пр} = 0,96$, что обусловит процесс выделения средненатурных легких примесей со скоростью витания частиц $v_{вт} = 3,2$ м/с. Увеличение $K_{пр}$ будет повышать эффективность процесса и, наоборот, при уменьшении значений $K_{пр}$ и соответственно увеличении скорости $v_{вт}$ условия выделения примесей будут ухудшаться.

Такие зависимости, выраженные влиянием природы примесей на эффективность сепарирования при однофакторном эксперименте, приведены в работах канд. техн. наук А. Я. Малиса.

В модель процесса введено три фактора: q , v_v и B , наиболее необходимые конструкторам для определения размеров пневмосепарирующего канала при разработке соответствующих машин и устройств разной производительности и назначения, определяемого требуемым уровнем эффективности при однократном сепарировании.

Тогда функциональная зависимость процесса сепарирования выразится

$$\eta = f(q, v_B, B). \quad (385)$$

Для построения линейной модели процесса реализован план проведения эксперимента ПФЭ $N = 2^3$ с трехкратной повторностью опытов $m = 3$ (табл. 18). Пределы варьирования независимых переменных в опытах, за исключением $v = 4,5-6,2$, сохранены в прежних значениях.

Таблица 18. Полный факторный эксперимент (ПФЭ $N=2^3$) процесса пневмосепарирования зерновой смеси в вертикальном воздушном потоке

Номер опыта	Входные параметры процесса			Выходные параметры процесса			
	$x_1(q)$	$x_2(v_B)$	$x_3(B)$	y_1	y_2	y_3	$y_4(\eta)$
1	50—	4,5—	130—	0,76	0,72	0,71	0,73
2	50—	6,2+	130—	0,78	0,85	0,83	0,82
3	200+	4,5—	130—	0,25	0,26	0,30	0,27
4	200+	6,2+	130—	0,39	0,35	0,34	0,36
5	50—	4,5—	200+	0,76	0,78	0,81	0,78
6	50—	6,2+	200+	0,90	0,91	0,86	0,89
7	200+	4,5—	200+	0,34	0,26	0,30	0,30
8	200+	6,2+	200+	0,47	0,42	0,40	0,43

Следует отметить, что процесс сепарирования, связывающий эффективность даже только с тремя этими факторами, вряд ли строго соответствует линейной модели, а поверхность отклика описывается плоскостью. Однако в рассматриваемом диапазоне изменения факторов такая модель может быть близка реальному процессу, чем, в частности, объясняется снижение пределов варьирования по v_B и B .

Уравнение регрессии в окончательном виде с учетом натуральной размерности факторов имеет вид

$$\eta = 0,5018 - 0,0031q + 0,0613v_B + 0,0008B. \quad (386)$$

Межфакторные взаимодействия, т. е. парные и тройные члены уравнения регрессии, малы по сравнению с остальными членами. Их количественное значение изменяет величину эффективности не более чем на 1%, что превышает погрешность при эксперименте.

Для удобства пользования уравнение регрессии протабулировано, и получены данные эффективности при большом разнообразии сочетаний нагрузки, скорости воздуха и ширины канала (табл. 19). Сравнение этих данных с результатами экспериментальных исследований в производственных условиях показывает удовлетворительную сходимость в диапазоне параметров, ограничивающих линейную модель процесса.

Таблица 19. Эффективность процесса пневмосепарирования в соответствии с полученной моделью при следующих постоянных: $A=3-4\%$, $K_B=0,10-0,12 \text{ м}^{-1}$, $K_{\text{пр}}=1,0 \text{ м}^{-1}$, $\Phi_B=15-20\%$, $\omega \approx 12,5\%$, $K_H=0,05-0,07$, $C_0=0,2-0,4 \text{ м/с}$, $\alpha=0^\circ$, $H_1 \geq 800 \text{ мм}$, $H_2=1,5 B$

B, мм	$v_B, \text{ м/с}$	$q, \text{ кг/см} \cdot \text{ч}$							
		4,50	4,75	5,00	5,25	5,50	5,75	6,00	6,25
130	50	0,72	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83
	100	0,57	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68
	150	0,41	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52
	200	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37
140	50	0,73	0,75	0,76	0,78	0,79	0,81	0,82	0,84
	100	0,58	0,59	0,61	0,62	0,64	0,65	0,67	0,69
	150	0,42	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50	0,51	0,53
	200	0,27	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,37
150	50	0,74	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85
	100	0,59	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69
	150	0,43	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54
	200	0,28	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38
160	50	0,75	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86
	100	0,59	0,61	0,62	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70
	150	0,44	0,45	0,47	0,48	0,50	0,52	0,53	0,55
	200	0,28	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,39
170	50	0,76	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86
	100	0,60	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71
	150	0,45	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55
	200	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40
180	50	0,77	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87
	100	0,61	0,63	0,64	0,67	0,67	0,69	0,70	0,72
	150	0,45	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56
	200	0,30	0,31	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41
190	50	0,77	0,79	0,80	0,82	0,83	0,85	0,87	0,88
	100	0,62	0,63	0,65	0,66	0,68	0,69	0,71	0,73
	150	0,46	0,48	0,49	0,51	0,52	0,54	0,55	0,57
	200	0,31	0,32	0,34	0,35	0,37	0,38	0,40	0,41
200	50	0,78	0,80	0,81	0,83	0,84	0,86	0,87	0,89
	100	0,63	0,64	0,66	0,67	0,69	0,70	0,72	0,73
	150	0,47	0,49	0,50	0,52	0,53	0,55	0,56	0,58
	200	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,39	0,41	0,42

§ 3. Пневматическое сепарирование в псевдооживленном слое

Этот способ разделения зерновой смеси на две или три фракции эффективен в том случае, когда компоненты существенно различаются по скорости витания частиц, например при сепарировании продуктов шелушения крупных культур (рис. 69).

Основной рабочий орган сепаратора — это неподвижный канал (рис. 70), ограниченный снизу плоской наклонной пористой перегородкой 1 из одного-двух слоев бязи, защищенной от продукта металлотканой сеткой. Через пористую перегородку 1 проходит равномерный по площади восходящий поток воздуха, характеризуемый скоростью фильтрации v_f , вычисляемой как объемный расход, отнесенный к площади пористой перегородки. Исходная смесь поступает из-под заслонки 2, ограничивающей производительность, в верхнем конце канала на пористую перегородку и, приобретая текучесть благодаря аэрации, движется по ней вниз до встречи с вертикальной поперечной перегородкой — экраном 3. Воздушный поток выносит из слоя легкие компоненты: муку и лузгу, скорость витания которых меньше v_f , а очищенный от них слой тяжелого компонента (ядра и зерна) проходит в прямоугольную щель под экраном и, преодолев сопротивление порога 4, поступает в выпускной канал 5 в качестве 1-й фракции. Воздушный поток выносит из слоя легкие компоненты: муку и лузгу, скорость витания которых меньше v_f , а очищенный от них слой тяжелого компонента (ядра и зерна) проходит в прямоугольную щель под экраном и, преодолев сопротивление порога 4, поступает в выпускной канал 5 в качестве 1-й фракции.

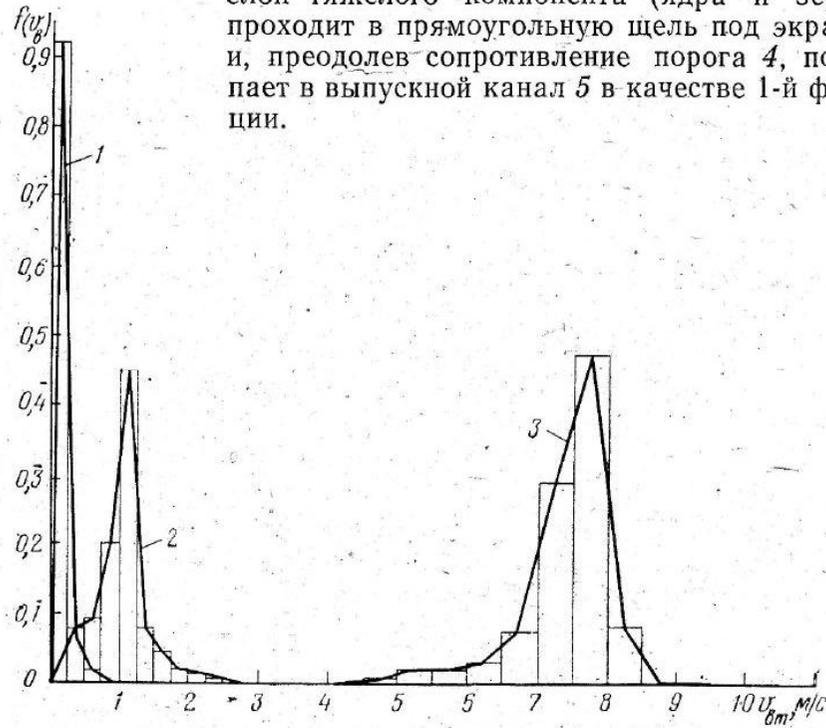


Рис. 69. Полигоны распределения скоростей витания продуктов шелушения:

1 — мука; 2 — лузга; 3 — ядро и зерно.

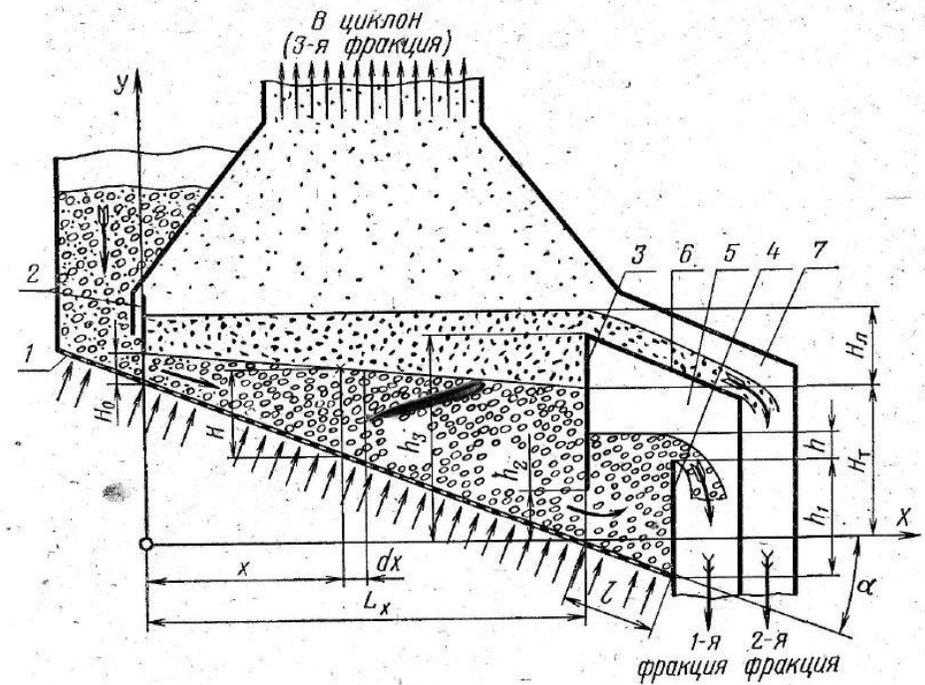


Рис. 70. Схема рабочего канала сепаратора с псевдооживленным слоем: 1 — пористая перегородка; 2 — заслонка; 3 — экран; 4 — порог; 5 — выпускной канал 1-й фракции; 6 — лоток для лузги; 7 — выпускной канал 2-й фракции.

Более легкий компонент — лузга, частицы которой имеют в среднем скорость витания, близкую к скорости фильтрации, покинув псевдооживленный слой тяжелого компонента, накапливаются над ним, образуя верхний («кипящий») слой, сливающийся через верхнюю кромку экрана по лотку 6 в выпускной канал 7 в качестве 2-й фракции. Во избежание уноса лузги воздушным потоком горизонтальное сечение канала над верхней кромкой экрана увеличивают для необходимого снижения скорости воздушного потока.

Самый легкий компонент — мука, скорость витания частиц которой меньше скорости воздуха над «кипящим» слоем лузги, выносится из него в циклон, где осаждается, образуя 3-ю фракцию.

Гидродинамику псевдооживленного слоя наиболее наглядно можно описать кривой псевдооживления, представляющей собой зависимость аэродинамического сопротивления слоя сыпучего материала, количество которого на пористой перегородке остается постоянным, от скорости восходящего воздушного потока. Характерные кривые псевдооживления ядра и лузги проса показаны на рисунке 71. Максимумы на этих кривых означают начало псевдооживления при критической скорости воздуха $v_{кр}$, когда перепад давлений на границах слоя достигает значения силы тяжести

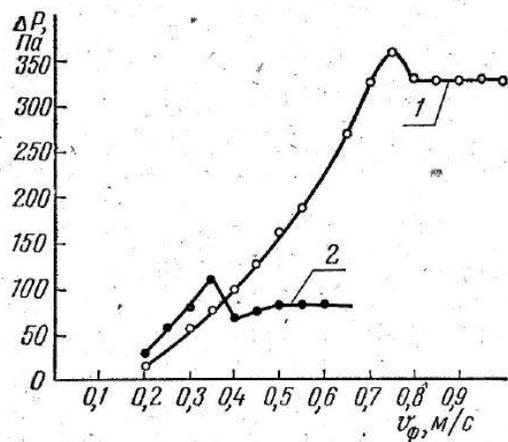


Рис. 71. Кривые псевдооживления компонентов:
1 — ядра и зерна; 2 — лузги.

выбрасываются отдельные частицы, образуются всплывающие пузыри и размывается верхняя граница слоя. Такая картина относится к слою, заключенному в цилиндрический сосуд с вертикальными стенками и горизонтальной пористой перегородкой. Для более тонкого слоя, движущегося вдоль наклонной пористой перегородки, картина несколько меняется: слой расширяется при значительно меньших скоростях воздуха; пузыри не образуются. Это объясняется непрерывным скольжением нижнего слоя по пористой перегородке и послойным движением продукта, что благоприятствует однородности и равномерности псевдооживления над всей пористой перегородкой при достаточно большом ее аэродинамическом сопротивлении, существенно превышающем сопротивление самого слоя [39].

В рассматриваемом аппарате поверхность раздела тяжелого и легкого компонентов вблизи экрана должна быть расположена около его середины по высоте: если она поднимается до верхней кромки экрана, то во 2-ю фракцию попадут частицы тяжелого компонента; если же она опустится до нижней кромки — частицы легкого компонента (лузги) будут увлечены в 1-ю фракцию.

Уровень поверхности раздела H_T (см. рис. 70) зависит от удельной нагрузки q , кг/(см·с), по исходной смеси, концентрации в ней легкого компонента, скорости фильтрации воздуха, высоты порога h_1 , высоты щели под экраном h_2 , высоты экрана h_3 , расстояния между порогом и экраном l и угла наклона пористой перегородки к горизонтали.

Для определения этого уровня используем аналогию псевдооживленного слоя капельной жидкости [68].

Представим движение тяжелого компонента через щель под экраном и порог как последовательное истечение через затопленное отверстие и водослив, для которых удельный массовый расход

твердых частиц, приходящих на единицу площади пористой перегородки. При дальнейшем возрастании скорости воздуха перепад давлений остается постоянным в результате увеличения порозности частиц и расширения слоя. Унос частиц однородного сыпучего тела начинается, когда скорость воздуха достигает скорости их витания. Этому предшествует переход от «спокойного» состояния слоя с четко обозначенной верхней границей к «кипящему» слою, при котором из него

q_T по формулам технической гидродинамики [68] запишем в следующем виде:

для отверстия

$$q_T = \rho_T \mu_0 h_2 \sqrt{2g\Delta H}; \quad (387)$$

для водослива

$$q_T = \rho_T \mu_B \sqrt{2gh}^{3/2}, \quad (388)$$

где ρ_T — плотность (объемная масса) слоя тяжелого компонента, кг/м³; μ_0 , μ_B — коэффициенты массового расхода соответственно для отверстия и водослива; ΔH — разность уровней до и после отверстия, приведенная к плотности слоя тяжелого компонента, м; h — напор водослива, м.

Из рисунка 70 имеем

$$\rho_T \Delta H = (\rho_T H_T + \rho_L H_L) - \rho_T (h_1 + h - l \operatorname{tg} \alpha),$$

откуда

$$\Delta H = H_T + H_L \frac{\rho_L}{\rho_T} - h - h_1 + l \operatorname{tg} \alpha. \quad (389)$$

Подставляя ΔH из уравнения (387) и h из уравнения (388) и решая относительно H_T , получим

$$H_T = -\frac{1}{2g} \left(\frac{q_T}{\rho_T \mu_0 h_2} \right)^2 + \frac{1}{\sqrt[3]{2g}} \left(\frac{q_T}{\rho_T \mu_B} \right)^{2/3} - H_L \frac{\rho_L}{\rho_T} + h_1 - l \operatorname{tg} \alpha. \quad (390)$$

Формула (390) согласуется с экспериментальными данными при скоростях фильтрации воздуха, в 1,5—2,0 раза превышающих критическую скорость в начале псевдооживления, что находится в области оптимальных параметров сепарирования.

Как показали эксперименты, коэффициент расхода для отверстия прямо пропорционален скорости фильтрации v_ϕ в указанной области и обратно пропорционален высоте порога h_1 , представляющего собой значительное местное сопротивление для потока тяжелого компонента

$$\mu_0 = \frac{v(v_\phi - v_{кр})}{\sqrt{h_1}}, \quad (391)$$

где v (м^{-1/2}с) — опытный коэффициент.

Коэффициент расхода для водослива μ_B зависит только от скорости фильтрации v_ϕ , причем в области оптимальных параметров эта зависимость линейна (рис. 72).

Третье слагаемое правой части формулы (390) зависит от высоты экрана h_3 , и практически его можно рассматривать как поправку на слой лузги в 10—15% от значения H_T (отношение $\frac{\rho_L}{\rho_T} = 0,25—0,35$ в области оптимальной скорости фильтрации для проса, риса, ячменя и гречихи).

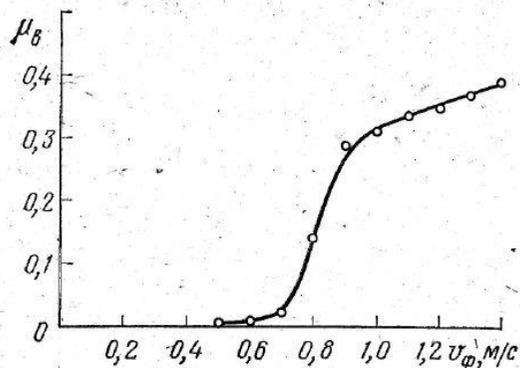


Рис. 72. Кривая влияния скорости фильтрации на коэффициент расхода для водослива для продуктов шелушения проса.

пористой перегородки при условии равномерного распределения легких частиц по всему объему в начале процесса.

Вынос легких частиц происходит по каналам, образующимся между зернами тяжелого компонента под действием воздушного потока при скорости фильтрации, превосходящей критическую скорость.

В межзерновом пространстве скорость $v_{м.з}$ связана со скоростью фильтрации v_{ϕ} зависимостью

$$v_{м.з} = \frac{v_{\phi}}{\varepsilon}, \quad (392)$$

где ε — порозность (доля пустот) в слое тяжелого компонента.

Когда скорость $v_{м.з}$ превосходит скорость витания $v_{вт}$ всех частиц легкого компонента, они увлекаются воздушным потоком и выносятся на поверхность слоя, причем скорость их подъема прямо пропорциональна разности $v_{м.з} - v_{вт}$.

Для частиц с близкими скоростями витания можно положить интенсивность выноса $\frac{dm}{dt}$, пропорциональной содержанию этих частиц в слое

$$-\frac{dm}{dt} = Km, \quad (393)$$

где $K = \text{const}$; m — масса легких частиц данного класса в слое.

Если по составу легкий компонент неоднороден и диапазон скоростей витания его частиц значителен, то первоначально выносятся частицы с меньшей скоростью витания, а остающиеся частицы, имеющие большую скорость витания, выносятся позже и менее ин-

Высота щели под экраном h_2 существенно влияет на устойчивость процесса при изменении удельной нагрузки q_T , с увеличением h_2 устойчивость повышается.

Область оптимальных значений h_2 для перечисленных культур составляет 10—18 мм.

Вынос легких частиц из псевдооживленного слоя. Первоначально рассмотрим вынос частиц легкого компонента из псевдооживленного слоя тяжелого компонента без учета его движения вдоль

тенсивно, что соответствует уменьшению K с уменьшением m . В первом приближении положим $K = K_0 m$. Тогда уравнение (393) принимает вид

$$-\frac{dm}{m^2} = K_0 t,$$

Интегрируя его в пределах от 0 до t и от m_0 (начальная масса легкого компонента в слое) до m , получим

$$\frac{1}{m} - \frac{1}{m_0} = K_0 t,$$

откуда коэффициент извлечения легкого компонента η

$$\eta = \frac{m_0 - m}{m_0} = \frac{t}{\frac{1}{K_0 m_0} + t}.$$

Назовем константой сепарации

$$C = \frac{1}{K_0 m_0}. \quad (395)$$

Тогда

$$\eta = \frac{t}{C + t}. \quad (396)$$

По экспериментальным данным

$$C = AH^2, \quad (397)$$

где A — коэффициент, зависящий от v_{ϕ} и от свойств компонентов, $m^{-2} \cdot c$; H — толщина слоя тяжелого компонента, м.

Формулу (396) перепишем в виде

$$\eta = \frac{t}{AH^2 + t}. \quad (398)$$

Эту формулу удобно применять при экспериментальном определении коэффициента A , когда в цилиндр с вертикальной осью на горизонтальную пористую перегородку, представляющую собой его дно, помещают слой равномерно перемешанных компонентов и, продувая его воздушным потоком с различными скоростями v_{ϕ} , определяют η по истечении заданного времени t .

Из формулы (398) имеем

$$A = \frac{t(1 - \eta)}{H^2 \eta}. \quad (399)$$

Характерная кривая зависимости $A(v_{\phi})$ для продуктов шелушения гречихи показана на рисунке 73, а в таблице 20 приведены

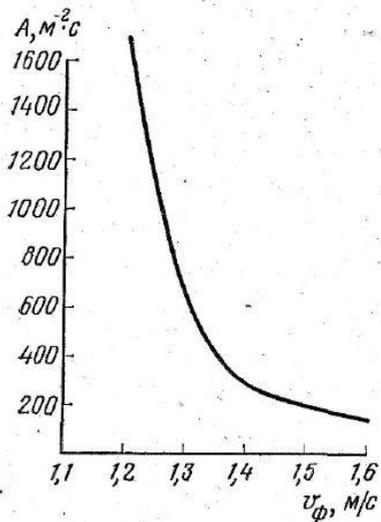


Рис. 73. Характерная кривая зависимости A (v_f) для продуктов шелушения гречихи при количестве несвязанной лузги 12% и $v_n=1,5$ м/с.

проекции $v_x = \frac{dx}{dt}$ скоростей частиц в этом столбике равны, по всей вероятности, его высоте.

Таблица 20. Значения коэффициентов A для основных крупяных культур

Культура	Скорость фильтрации v_f , м/с	Коэффициент A , м ⁻² с
Рис	1,7	360
Просо	1,2	320
Гречиха	1,4	280
Ячмень	1,7	131

По условию неразрывности потока тяжелого компонента имеем

$$q_T = H \rho_T \frac{dx}{dt} \quad (402)$$

откуда

$$dt = \frac{\rho_T}{q_T} H dx.$$

В уравнение (394) подставим dt из формулы (402) и $K_0 = \frac{1}{Am_0H^2}$, полученное при сопоставлении формул (395) и (397).

значения коэффициентов A для основных крупяных культур при оптимальных скоростях фильтрации.

Переходя к выносу частиц легкого компонента из слоя тяжелого компонента переменной толщины, как это происходит в канале сепаратора, примем зависимость толщины слоя H от координаты x по горизонтали (см. рис. 70) такой:

$$H = H_0 + bx = H_0 \left(1 + \frac{b}{H_0} x\right), \quad (400)$$

где

$$b = \frac{H_T - H_0}{L_x}. \quad (401)$$

Полагаем также, что столбик тяжелого компонента сохраняет свое вертикальное положение в потоке от сечения $x=0$ до сечения $x=L_x$. Иначе говоря, допустим, что горизонтальные

Тогда

$$-\frac{dm}{m^2} = \frac{\rho_T dx}{Am_0 q_T H}.$$

Подставляя H из уравнения (400), запишем

$$-\frac{dm}{m^2} = \frac{\rho_T}{Am_0 q_T H_0} \cdot \frac{dx}{1 + \frac{b}{H_0} x}. \quad (403)$$

Интегрируя от m_0 до m и от 0 до x , получим

$$\frac{1}{m} - \frac{1}{m_0} = \frac{\rho_T}{Am_0 q_T b} \ln \left(1 + \frac{b}{H_0} x\right), \quad (404)$$

откуда

$$\eta = 1 - \frac{m}{m_0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\rho_T}{Aq_T b} \ln \left(1 + \frac{b}{H_0} x\right)}. \quad (405)$$

Коэффициент извлечения легкого компонента во всем рабочем канале при $x=L_x$:

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\rho_T}{Aq_T b} \ln \left(1 + \frac{b}{H_0} L_x\right)}. \quad (406)$$

Результаты расчета по формуле (406) хорошо согласуются с опытными данными (рис. 74). Расхождение между результатами расчета и эксперимента для продуктов шелушения основных крупяных культур (риса, проса, ячменя, гречихи) не превосходит 5%. Характерно, что во всех случаях расчетное значение η меньше экспериментального. Причина этого заключается в том, что в формулу (406) подставляли значения коэффициента A , найденные в слое неподвижном относительно пористой перегородки. Во время экспериментов слой тяжелого компонента дополнительно расширялся в результате послыжного движения и скольжения нижнего слоя, что благоприятствует самосортированию и перемещению легких частиц в верхние слои.

Анализ формулы (406) показывает, что увеличению коэффициента извлечения η благоприятствуют возрастание плотности ρ_T псевдооживленного слоя тяжелого компонента,

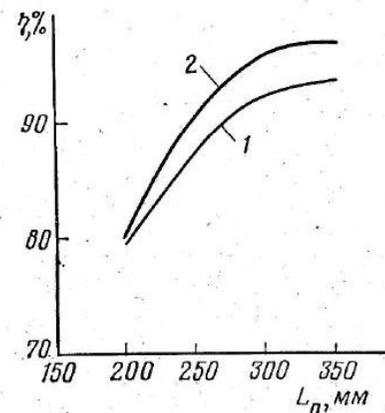


Рис. 74. Характерные кривые зависимости коэффициента извлечения лузги η из продуктов шелушения риса от длины рабочего канала L_n : 1 — расчетная; 2 — опытные данные.

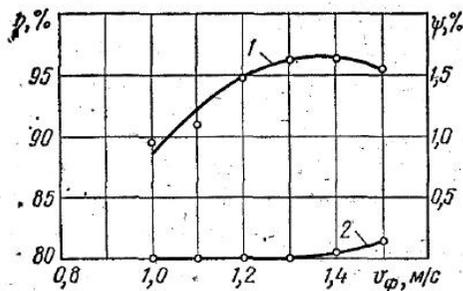


Рис. 75. Кривые влияния скорости фильтрации на эффективность сепарирования продуктов шелушения проса: 1 — коэффициент извлечения лузги η ; 2 — содержание зерна и ядра в извлеченной лузге ψ .

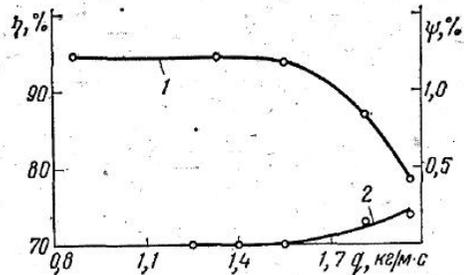


Рис. 76. Кривые влияния удельной нагрузки на эффективность сепарирования продуктов шелушения проса: 1 — коэффициент извлечения лузги η ; 2 — содержание зерна и ядра в извлеченной лузге ψ .

начальной толщины слоя продукта H_0 и длины рабочего канала L_x , уменьшение удельной нагрузки q_T и коэффициента b .

Высокий коэффициент извлечения η можно получить и при меньшей длине канала путем повышения скорости фильтрации, что вызывает существенное уменьшение коэффициента A . Однако чрезмерное увеличение скорости воздушного потока так же, как и уменьшение длины рабочего канала, приводит к попаданию частиц тяжелого компонента во 2-ю фракцию — лузгу. Происходит это потому, что псевдооживленный слой тяжелого компонента переходит в «кипящее» состояние, поверхность раздела компонентов теряет четкость, тяжелые частицы выбрасываются в «кипящий» слой легкого компонента и увлекаются с ним через верхнюю кромку экрана.

Для настройки аппарата на оптимальный режим при сепарировании продуктов шелушения различных крупяных культур при изменении концентрации легкого компонента или нагрузки по исходной смеси необходимо регулировать следующие параметры: скорость фильтрации v_f ; толщину слоя H_0 путем изменения положения питающей заслонки; высоту порога h_1 ; высоту щели под экраном h_2 ; высоту экрана h_3 .

На рисунке 75 показаны кривые зависимости коэффициента извлечения лузги η и относительного содержания зерна и ядра в лузге ψ при сепарировании продуктов шелушения проса от скорости фильтрации воздуха, а на рисунке 76 — от удельной нагрузки при оптимальной скорости фильтрации.

§ 4. Прогнозирование технологической эффективности пневмосепарирования

Экспериментальные исследования и испытания пневмосепарирующих устройств позволили обобщить большое количество данных для вероятностной оценки возможности разделения сепарируемых смесей.

При эксплуатации пневмосепарирующих машин и устройств эффективность их определяют опытным путем по балансу продуктов, получаемых в результате сепарирования за определенное время в соответствии с зависимостями, приведенными в главе 1.

Сложнее обоснованно определить эффективность при создании или модернизации машин в соответствии с требованиями технического задания. Обычно конструкторы пользуются данными экспериментальных исследований, которые, как правило, ограничены определенными условиями: типом канала, видом и характеристиками сырья, геометрией и конструкцией устройства и т. д., в связи с чем распространение их на новые конструкции не всегда приводит к правильным результатам, что предопределяет большие доводочные работы, а иногда и переработку конструкции.

При теоретических исследованиях процесса пневмосепарирования, где определяли скорости и перемещения частиц тяжелого и легкого компонентов, мы ввели понятие коэффициента пропорциональности силы аэродинамического сопротивления (K), позволившего нагляднее представить действие сил на частицу в процессе сепарирования, и установили его связь со скоростью витания ($v_{вт}$) при взвешивании частицы в воздушном потоке. Для определения эффективности процесса пневмосепарирования удобнее воспользоваться скоростями витания зерновок и примесей, которые определены многими исследователями процесса пневмосепарирования и достаточно полно приведены в специальной литературе.

При необходимости знать точные значения скоростей витания целесообразно пользоваться экспериментальными методами.

Экспериментальное определение скоростей витания основной культуры и примесей показало, что значение их для одного класса, района произрастания и прочих равных условиях изменяются, следуя закону нормального распределения. Поля скоростей воздушного потока в пневмосепарирующем канале неравномерны, опыт исследований и испытаний показал, что коэффициент вариации $\Phi = 12-25\%$.

В последние годы известны попытки аналитически определить эффективность сепарирующих машин в предпроектном расчете. Так, Х. Румпфом и К. Лешонски (Технологический институт, г. Карлсруэ, ФРГ) сделана попытка аналитически подсчитать эффективность на основе вероятностных характеристик компонентов разделяемой смеси по их аэродинамическому признаку. Однако предлагаемая методика не учитывает изменения основных пара-

метров процесса и основана только на теоретическом факторе — степени разделяемости компонентов.

В нашей работе эффективность пневмосепарирования рассмотрена в зависимости от вероятностных характеристик компонентов смеси (по скорости витания) и воздушного потока в пневмосепарирующем канале, а также от весового соотношения разделяемых компонентов.

Взаимное расположение кривых распределения скоростей витания компонентов неодинаково для различных двухкомпонентных смесей. Смесей, разделяемые на зерноперерабатывающих заводах для очистки, как правило, имеют частично перекрывающиеся кривые распределения.

Скорость воздушного потока в сечении канала, находящемся на уровне входа зерна (сечение разделения), — случайная непрерывная величина, принимающая любое значение в диапазоне между минимальной и максимальной. В связи с этим поле скоростей можно представить также в виде кривой распределения.

Анализируя совместно кривые распределения скоростей витания компонентов и распределения скоростей воздушного потока в сечении разделения, можно теоретически определить возможную эффективность пневмосепарирования смеси. Для рассмотрения такого метода введем следующие обозначения:

$P_{и}$ — количество исходного продукта, поступающего в канал в единицу времени; $P_{сх}$ — количество продукта, выпавшего из канала, называемого условно сходовым продуктом; $P_{пр}$ — количество продукта, унесенного воздушным потоком, называемого условно проходным продуктом; $P_{т}$ — количество тяжелого компонента (зерна) в исходном продукте; $P_{л}$ — количество легкого компонента (примесей) в исходном продукте; $R_{т}$ — количество тяжелого компонента в сходе ($P_{сх}$); $q_{л}$ — количество легкого компонента в сходе; $R_{л}$ — количество легкого компонента в проходе ($P_{пр}$); $q_{т}$ — количество тяжелого компонента в проходе.

Тогда очевидны такие соотношения: $P_{и} = P_{сх} + P_{пр} = P_{т} + P_{л}$; $P_{сх} = R_{т} + q_{л}$; $R_{пр} = R_{л} + q_{т}$; $P_{т} = R_{т} + q_{т}$; $P_{л} = R_{л} + q_{л}$.

Эффективность сепарирования определяется как

$$E = (R_{л}/P_{л}) \cdot 100\% \text{ или } \eta = R_{л}/P_{л}, \quad (407)$$

а четкость сепарирования

$$a = (q_{т}/P_{пр}) \cdot 100\% \text{ или } z = q_{т}/P_{пр}. \quad (408)$$

Обозначим весовое соотношение компонентов через

$$\varepsilon = P_{т}/P_{л} \quad (409)$$

и введем понятие степени уноса тяжелого компонента ψ_y

$$\psi_y = q_{т}/P_{т}. \quad (410)$$

После подстановки и преобразования формулы (408) получим зависимость четкости сепарирования в виде

$$z = \varepsilon \psi_y / (\varepsilon \psi_y + \eta). \quad (411)$$

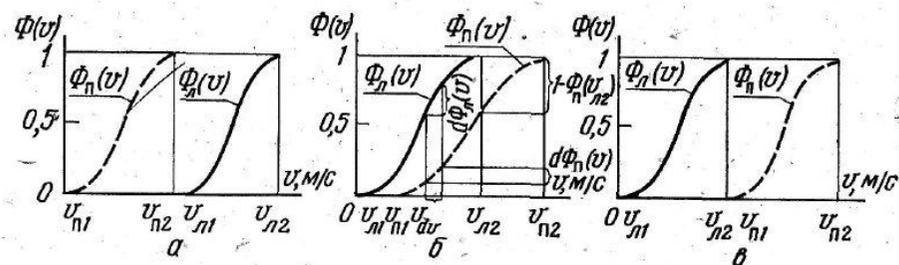


Рис. 77. Сочетание кривых распределения скоростей витания легкого компонента и воздушного потока: а — выделения легкого компонента не произойдет; б — частичное выделение легкого компонента; в — полное выделение легкого компонента.

Ограничим условия сепарирования следующими допущениями: через 1 см сечения канала в окрестностях любой точки в единицу времени проходят постоянные количества тяжелого и легкого компонентов;

плотности распределения скоростей витания тяжелого и легкого компонентов, попавших на любую элементарную площадку сечения разделения, одинаковы.

Сочетания кривых распределения скоростей витания выделяемого легкого компонента и скоростей воздушного потока могут быть различны. На рисунке 77 приведены предельные случаи: а — когда выделение легкого компонента не произойдет и б — когда он будет выделен полностью. Однако такие случаи не характерны для условий сепарирования при очистке зерна воздушным потоком.

Рассмотрим реальный случай, т. е. когда функции распределения $v_{вт}$ легкого компонента $\Phi_{л}(v)$ и распределения скоростей воздушного потока $\Phi_{п}(v)$ несколько перекрываются (рис. 77, б). Частотность выбора элементарных площадок на сечении разделения, которым соответствуют определенные скорости, пропорциональны вероятностям появления этих скоростей. Предполагая равномерное распределение компонентов по сечению разделения, можно записать, что количество компонента, поступающего в единицу времени на элементарную площадку сечения, равно произведению всего поступающего количества компонента $P_{л}$ на элемент вероятности $f_{п}(v) dv$ скоростей воздушного потока.

Количество компонента, поступающего в единицу времени на все площадки, характеризуемые скоростями воздушного потока в пределах от какого-то значения v_1 до некоторого значения v_2 , будет равно

$$P_{л} [\Phi_{л}(v_2) - \Phi_{л}(v_1)].$$

На элементарную площадку со скоростями воздуха от v до $v + dv$ (см. рис. 77, б) поступает количество компонента $P_{л} f_{п}(v) dv$ или $P_{л} d\Phi_{п}(v)$.

Поскольку плотность вероятностей $v_{вт}$ компонента, поступающего на элементарную площадку и на все сечение разделения

одинакова, то с площадки будет унесена только доля (от единицы) поступающего количества компонента

$$\int_0^v f_{\text{л}}(v) dv = \Phi_{\text{л}}(v).$$

Таким образом, количество компонента, извлеченного с элементарной площадки, составит

$$dP_{\text{л}} = \Pi_{\text{л}} f_{\text{л}}(v) dv \Phi_{\text{л}}(v).$$

Со всего сечения разделения будет унесено количество компонента

$$P_{\text{л}} = \Pi_{\text{л}} \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv, \quad (412)$$

а эффективность очистки с учетом уравнения (407) составит

$$\eta = \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv. \quad (413)$$

При рассмотрении отдельно частей сечения разделения, характеризующихся скоростями от $v_{\text{п1}}$ до $v_{\text{л2}}$ и от $v_{\text{л2}}$ до $v_{\text{п2}}$, общая формула (413) приводится к частному виду, характерному для случая, рассматриваемого на рисунке 77, б.

Воздушным потоком со скоростями в пределах от $v_{\text{п1}}$ до $v_{\text{л2}}$ будет унесено следующее количество легкого компонента:

$$\Pi_{\text{л}} \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{л2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv.$$

С остальной части сечения разделения, характеризующейся скоростями от $v_{\text{л2}}$ до $v_{\text{п2}}$, будет унесено все количество компонента, так как скорость в любой точке этой части сечения больше максимальной скорости витания.

Это количество составит $\Pi_{\text{л}} [1 - \Phi_{\text{л}}(v_{\text{л2}})]$.

Тогда общее количество извлеченного легкого компонента будет

$$P_{\text{л}} = \Pi \left\{ \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{л2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv + [1 - \Phi_{\text{л}}(v_{\text{л2}})] \right\}, \quad (414)$$

а эффективность очистки

$$\eta = \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{л2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv + [1 - \Phi_{\text{л}}(v_{\text{л2}})]. \quad (415)$$

Рассмотрим совместно кривые распределения тяжелого, легкого компонентов и скоростей воздушного потока в сечении разде-

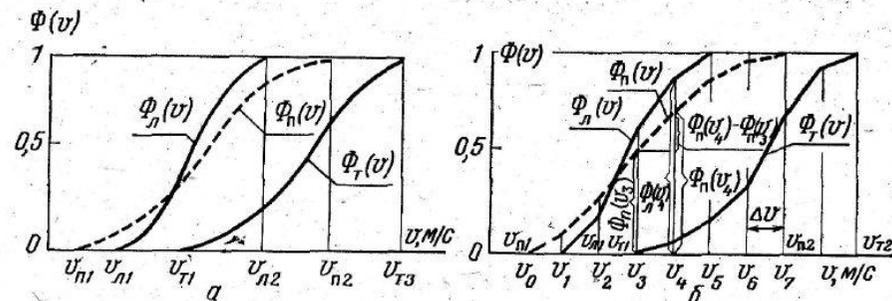


Рис. 78. Сочетание скоростей витания компонентов и воздушного потока в виде:
а — кривых распределения; б — полигонов распределения.

ления (рис. 78, а). Степень извлечения легкого компонента определяется зависимостью, которая в соответствии с взаимным расположением $\Phi_{\text{л}}(v)$ и $\Phi_{\text{п}}(v)$ примет вид

$$\eta = \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{л2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv + [1 - \Phi_{\text{п}}(v_{\text{л2}})]. \quad (416)$$

Степень уноса тяжелого компонента определяется по аналогии с уравнением (413)

$$\psi_{\text{т}} = \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv, \quad (417)$$

где $\Phi_{\text{т}}$ — функция распределения $v_{\text{т}}$ тяжелого компонента, а частный вид уравнения (417) для рассматриваемого на рисунке 78, а случая сочетания $\Phi_{\text{т}}(v)$ и

$\Phi_{\text{п}}(v)$ будет $\psi_{\text{т}} = \int_{v_{\text{т1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv$.

Четкость сепарирования с учетом уравнения (411) и преобразований в общем виде

$$z = \frac{\varepsilon \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv}{\varepsilon \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv + \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv}, \quad (418)$$

в частном виде для рассматриваемого случая

$$z = \frac{\varepsilon \int_{v_{\text{т1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv}{\varepsilon \int_{v_{\text{т1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{т}}(v) f_{\text{т}}(v) dv + \int_{v_{\text{п1}}}^{v_{\text{п2}}} \Phi_{\text{л}}(v) f_{\text{л}}(v) dv + [1 - \Phi_{\text{л}}(v_{\text{л2}})]}$$

Полученные общие зависимости для определения эффективности и четкости пневмосепарирования двухкомпонентной смеси в вертикальном канале позволяют в первом приближении оценить эффективность его, например, для предпроектных расчетов.

Для пользования этими зависимостями в приближенных расчетах удобнее преобразовать их с учетом возможности применения методов математической статистики, т. е. кривые распределения заменить полигонами распределения, построенными на основе полей скорости в пневмосепарирующих каналах и классификации компонентов смеси по скоростям витания, получаемой на воздушных классификаторах. В этом случае показатели эффективности пневмосепарирования η и ψ_y можно получить без интегрирования, суммируя произведения приращения $\Delta\Phi_n(v)$ для каждого классового промежутка на функцию распределения $\Phi_n(v)$ или $\Phi_T(v)$ для соответствующей варианты.

В качестве примера заменим интегральные кривые, приведенные на рисунке 78, а, полигонами распределения (рис. 78, б). Здесь интервал скоростей воздушного потока от v_{n1} до v_{n2} разбит на m классовых промежутков Δv .

Степень извлечения легкого компонента определится суммой

$$\eta = \Phi_n(v_1)\Phi_n(v_1) + \Phi_n(v_2)[\Phi_n(v_2) - \Phi_n(v_1)] + \dots + \Phi_n(v_m)[1 - \Phi_n(v_{m-1})] \quad (419)$$

Степень уноса тяжелого компонента

$$\psi_y = \Phi_T(v_1)\Phi_n(v_1) + \Phi_T(v_2)[\Phi_n(v_2) - \Phi_n(v_1)] + \dots + \Phi_T(v_m)[1 - \Phi_n(v_{m-1})] \quad (420)$$

Четкость сепарирования при этом определяют по формуле (411).

Пример. Определим эффективность пневмосепарирующего устройства ворохоочистителя ЗВ-50 и сопоставим полученные результаты с данными производственных испытаний.

В одной из серий опытов при производственных испытаниях ворохоочистителя ЗВ-50, проведенных Кустанайской МИС, очистке подлежала партия зерна пшеницы влажностью 13,9% с содержанием сорной примеси 6,3 и зерновой 8,1%. Количество примесей, отделимых воздушным потоком, составляло 4—4,5%. Результаты классификации смеси представлены в виде дифференциальных полигонов распределения скоростей витания зерна пшеницы и частиц примесей (рис. 79, а). Численные значения поля скоростей воздушного потока в сечении разделения при $v_{ср} = 6,23$ м/с представлены в таблице 21. Коэффициент вариации поля скоростей $\Phi = 15,4\%$, что примерно отвечает данному классу машин.

По таблице 21 составим вариационную таблицу 22 распределения скоростей воздушного потока в сечении разделения. На рисунке 79, б приведен интегральный полигон распределения скоростей воздушного потока в сечении разделения, построенный по таблице 22. В этих же осях координат на основе дифференциальных полигонов построены интегральные полигоны скоростей витания компонентов.

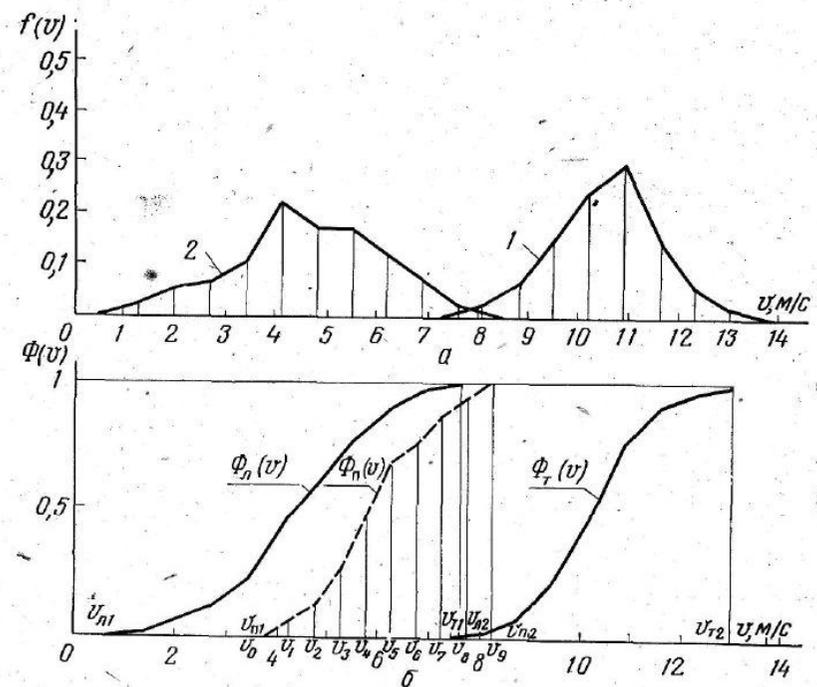


Рис. 79. Дифференциальные (а) и интегральные (б) полигоны распределения скоростей витания компонентов и воздушного потока: 1 — зерна пшеницы; 2 — частицы примесей.

Таблица 21. Данные измерений поля скоростей в канале ворохоочистителя ЗВ-50

Полигоны распределения при $v_{ср} = 6,23$ м/с и $\Phi = 15,4\%$	Скорости воздушного потока в отдельных точках сечения канала (по длине $L = 2200$ мм и ширине 220 мм), м/с										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
По ширине канала	I	7,23	4,77	4,77	5,41	8,08	7,23	5,41	4,47	4,40	7,68
	II	6,99	5,98	6,25	5,98	8,28	6,25	6,75	5,70	6,25	7,23
	III	5,41	5,41	5,98	6,25	7,68	5,98	6,25	5,98	6,25	6,25

Весовое соотношение компонентов разделяемой смеси составляет $\epsilon = 95,5\% : 4,5\% = 21,3$.

Измеряя варианты $\Phi_n(v_i)$ и $\Phi_T(v_i)$ и приращения $\Phi_n(v_i) - \Phi_n(v_{i-1})$ на полигонах (см. рис. 79, б) по формулам (419), (420) и (421), подсчитываем показатели эффективности пневмосепарирования

$$\eta = 0,49 \cdot 0,067 + 0,61 \cdot 0,067 + 0,73 \cdot 0,134 + 0,83 \cdot 0,2 + 0,91 \cdot 0,231 + 0,96 \cdot 0,067 + \dots + 0,99 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,067 + 1 \cdot 0,067 = 0,845;$$

$$\psi = 0,008 \cdot 0,04 + 0,03 \cdot 0,067 = 0,00232;$$

$$z = (21,3 \cdot 0,00232) / (21,3 \cdot 0,00232 + 0,845) = 0,056.$$

Таким образом, расчетная эффективность пневмосепарирующего устройства ворохоочистителя ЗВ-50 составляет 84,5% при содержании годного зерна в отходах до 5,6%.

Для достижения показателей по содержанию годного зерна в отходах, которое при первичной очистке даже с учетом сушки и очистки отходов не должно превышать 2—3%, необходимо снизить скорость воздуха в пневмосепарирующем канале.

Тогда в данные расчета нужно внести коррективы по $v_{\text{ср}}$, например снизить ее до 5,8—6 м/с. В этом случае для предпроектных расчетов можно было бы принять эффект очистки по легким примесям ворохоочистителя ЗВ-50 в пределах 75—80% при $a \leq 3\%$.

Результаты испытаний ворохоочистителя показали, что максимальная эффективность его (по легким примесям) при ранее приведенных характеристиках зерновой смеси составила: $E = 80,5\%$ при четкости $a = 2,9\%$.

Высокий эффект очистки как расчетный, так и фактический объясняется характером примесей.

В частности, из рисунка 79, а видно, что скорости витания частиц примесей и зерна пшеницы перекрываются незначительно, т. е. примеси низконатурные и более легко отделимы.

Эффект очистки, полученный расчетом, достаточно близок к соответствующему показателю, полученному при испытаниях. Точность рассматриваемого метода составляет 5—10% и позволяет воспользоваться им для предпроектных расчетов.

Расчетная четкость a_p сепарирования больше отличается от данных испытаний ($a = 2,9\%$, $a_p = 5,6\%$).

Рассматриваемый метод позволяет также определить эффективность последовательного двукратного и более сепарирования в соответствии с зависимостью

$$\eta_0 = \eta_1 + \eta_2 + \eta_1 \eta_2, \quad (421)$$

где η_1 и η_2 — эффективность очистки соответственно при первом и втором пневмосепарировании.

Таблица 22. Вариационная таблица распределения скоростей воздушного потока в сечении разделения

Границы интервала, м/с	Середина интервала, м/с	Абсолютная частота	Относительная частота $f(v_i)$	Относительная накопленная частота $\Phi(v_i)$
4,0—4,5	4,25	2	0,067	0,067
4,5—5,0	4,75	2	0,067	0,134
5,0—5,5	5,25	4	0,134	0,268
5,5—6,0	5,75	6	0,200	0,468
6,0—6,5	6,25	7	0,231	0,699
6,5—7,0	6,75	2	0,067	0,766
7,0—7,5	7,25	3	0,100	0,866
7,5—8,0	7,75	2	0,067	0,933
8,0—8,5	8,25	2	0,067	1,000

Глава 8. МАГНИТНОЕ СЕПАРИРОВАНИЕ

В технологических процессах зерноперерабатывающих предприятий сырье и промежуточные продукты от металломагнитных примесей очищают на магнитных сепараторах с постоянными магнитами или электромагнитами, причем Правилами организации и ведения технологического процесса этот этап очистки регламентируется нормами установки магнитных заградителей [59]. Разделяющий признак — это магнитные свойства компонентов.

Металломагнитные примеси, встречающиеся в зерне, комбикормовом сырье и т. д., весьма разнообразны по размерам, форме и происхождению: случайно попавшие мелкие металлические предметы, продукты износа рабочих органов и другие.

На рисунке 80 приведены технологические схемы магнитных сепараторов, наиболее широко распространенных в отечественных и зарубежных конструкциях и отличающихся способом удаления металломагнитных примесей из движущегося потока.

Для нормального протекания процесса отделения металломагнитных примесей в магнитном поле в общем случае должно выполняться следующее условие:

$$F_M = V \kappa H \text{ grad } H > F_c$$

$$\text{и } f_m = \frac{F_M}{m} = \frac{V \kappa H \text{ grad } H}{V \delta} = \frac{\kappa}{\delta} H \text{ grad } H, \quad (422)$$

где F_M — сила притяжения металломагнитной частицы к магниту, Н; V — объем частицы, м³; m — масса частицы, кг; δ — плотность частицы, кг/м³; H — напряженность магнитного поля, А/м; $\text{grad } H$ — градиент напряженности поля, представляющий собой производную $\frac{dH}{dr}$ в направлении r (наибольшего возрастания напряженности H); F_c — сила сопротивления, Н; κ — удельная объемная магнитная восприимчивость частицы, м³/кг.

Магнитные поля по напряженности бывают однородными ($\text{grad } H = 0$) и неоднородными ($\text{grad } H > 0$).

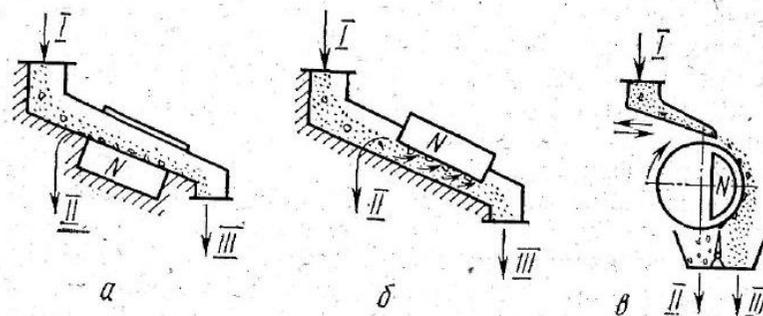


Рис. 80. Технологические схемы магнитных сепараторов: а — с нижним расположением магнитов; б — с верхним расположением магнитов; в — барабанные, с вращающейся немагнитной обечайкой; I — исходная смесь; II — металломагнитные примеси; III — очищенный продукт.

В магнитном поле сила, действующая на частицу, определяется величиной потенциальной энергии U , приобретаемой частицей при ее намагничивании [42]

$$U = - \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV. \quad (423)$$

$$\text{Тогда } F_M = - \text{grad } U = \text{grad} \int_V \frac{\mu_0 \kappa H^2}{2} dV.$$

Допустив, что в пределах объема частицы магнитная восприимчивость постоянна и изменение H невелико, запишем

$$F_M = \mu_0 \kappa V H \text{ grad } H \quad (424)$$

или

$$f_M = \frac{F_M}{m} = \frac{\mu_0 \kappa V H \text{ grad } H}{\delta V} = \mu_0 \frac{\kappa}{\delta} H \text{ grad } H, \quad (425)$$

где f_M — сила притяжения частицы к магниту, отнесенной к единице массы, Н/кг.

Как видно из формул (424 и 425), сила, действующая на частицу в магнитном поле, зависит от магнитных свойств частицы, напряженности поля и ее изменения.

§ 1. Процесс сепарирования в магнитных аппаратах с нижним расположением магнитов

Модель процесса магнитной сепарации зерна в сепараторе гравитационного типа с нижним расположением магнитов рассмотрена с учетом действия сил гравитации, магнитных пондеромоторных сил и сил сопротивления среды [66]. При этом сделано допущение, что движения ферромагнитной частицы относительно частиц среды в направлении средней скорости потока нет, а в направлении нормали к плоскости магнитных полюсов это движение не зависит от движения в направлении средней скорости потока: ферромагнитная частица соразмерна с частицами среды и имеет форму шара, и сила, подобная Архимедовой, пренебрежительно мала сравнительно с учитываемыми силами.

Процесс магнитной сепарации протекает в две стадии: первая — осаждение ферромагнитной частицы на магнитный полюс; вторая — удерживание ее от смывания потоком очищаемого продукта.

Схематическое изображение сил, действующих на ферромагнитную частицу в первой стадии процесса, в соответствии с описанной моделью представлено на рисунке 81.

По плоскости из диамагнитного материала толщиной δ , наклонной к горизонту под углом α , движется поток очищаемого продукта толщиной слоя H со средней скоростью v . Ферромагнитная

частица в виде шара радиусом r расположена в верхнем слое очищаемого продукта, ее центр масс удален от поверхности магнитного экрана на расстояние H . Под наклонной плоскостью расположен источник магнитного поля.

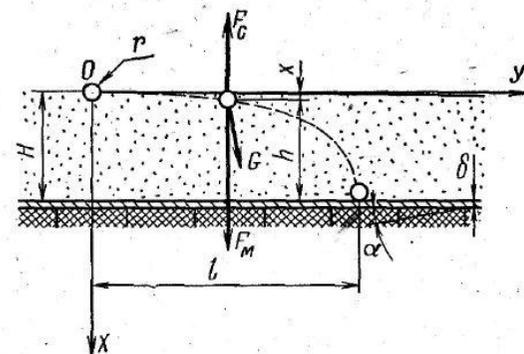


Рис. 81. Схема процесса магнитной сепарации в аппаратах с нижним расположением магнитов.

На ферромагнитную частицу действуют: сила тяжести G , сила притяжения к магниту F_M и сила сопротивления среды F_c . Ферромагнитная частица проходит через слой продукта и осаждается на поверхности магнитного экрана за время T , перемещаясь при этом на расстояние l в направлении движения потока.

Ось X нормальна к плоскости магнитного экрана, ось Y параллельна направлению движения потока, начало координат совпадает с центром тяжести ферромагнитного шарика в исходном положении.

Определим протяженность магнитного поля, необходимую для осаждения ферромагнитной примеси, находящейся в верхнем слое потока. Первое допущение о том, что нет относительного движения между ферромагнитной частицей и частицами среды в направлении оси Y , позволяет свести поставленную задачу к определению времени осаждения ферромагнитной примеси, выраженную через параметры процесса.

В соответствии со вторым допущением движения ферромагнитной частицы можно рассматривать только в направлении оси X , считая при этом, что в направлении оси Y она передвинется за время осаждения T на путь l , определяемый произведением средней скорости потока v на время осаждения T

$$l = vT. \quad (426)$$

Дифференциальное уравнение движения ферромагнитной частицы в направлении оси X имеет следующий вид:

$$\ddot{x} = g \cos \alpha + f_M - f_c, \quad (427)$$

где \ddot{x} — проекция ускорения ферромагнитной частицы на ось X ; α — угол наклона плоскости магнитного экрана к горизонту; $f_M = \frac{F_M}{m}$ — сила притяжения ферромагнитной частицы к магниту, отнесенная к единице ее массы; $f_c = \frac{F_c}{m}$ — сила сопротивления среды, отнесенная к единице массы ферромагнитной частицы.

Исследования показали, что силы f_M и f_c непостоянны и зависят от координаты X .

Непосредственные измерения силы притяжения ферромагнитных частиц к магнитам при различном расстоянии между ними показали, что сила притяжения ферромагнитного тела к плоскому магнитному блоку f_m обратно пропорциональна расстоянию между ними h в степени n

$$f_m = \frac{A}{h^n}, \quad (428)$$

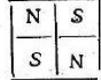
где A — коэффициент.

Для реальных условий сепарирования коэффициент A колеблется от 2000 до 12 000 $\text{см}^3\text{с}^{-2}$, а показатель степени n — от 1 до 3.

Коэффициент A соответствует ускорению ферромагнитного тела от силы притяжения его к магниту в точке, отстоящей от магнитного полюса на 1 см. Показатель степени n характеризует интенсивность изменения силы притяжения ферромагнитного тела к магниту в зависимости от расстояния его до поверхности магнитного полюса.

При характеристике блока магнитов коэффициент A и показатель степени n определяются не просто суммарным магнитным потоком отдельных магнитов, составляющих блок, а общей картиной силовых линий магнитного блока, формирующейся в результате взаимодействия полей отдельных магнитов, входящих в блок. Результат такого взаимодействия у магнитов различной конфигурации неодинаков. Так, при сборке в блок плоских магнитов разноименными полюсами магнитное поле усиливается в 2,5 раза, а сборка магнитов одноименными полюсами ослабляет результирующее поле вдвое. Обратная картина наблюдается при сложении полей подковообразных магнитов: блоки, собранные разноименными полюсами, вдвое слабее отдельной подковы, а одноименными полюсами — имеют примерно одинаковую характеристику с одиночным магнитом. Силовую характеристику магнита, подлежащего технологическому расчету, определяют только измерением.

Для примера ниже приведены силовые характеристики магнитных блоков, собранных по различным схемам из плиточных оксидно-бариевых магнитов*.

Схема блока				
Силовая характеристика блока $a_m(f_m) = \frac{A}{h^n}$	$\frac{4424}{h^{2,49}}$	$\frac{11\,940}{h^{1,63}}$	$\frac{11\,120}{h^{2,43}}$	$\frac{2263}{h^{2,00}}$

* Площадь полюса 85×65 мм, толщина плитки 14 мм.

Силу сопротивления среды f_c определили на основе опытных данных, позволивших установить ее закономерность для решения исходного дифференциального уравнения относительно времени осаждения.

Было установлено, что сила сопротивления среды f_c пропорциональна первой производной перемещения металломагнитной частицы по времени \dot{x} , а также толщине слоя очищаемого продукта H , т. е.

$$f_c = KH\dot{x}, \quad (429)$$

где K — коэффициент сопротивления среды; для зерна пшеницы $K = 280 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

В развернутом виде дифференциальное уравнение движения металломагнитной частицы выглядит таким образом:

$$\ddot{x} = g \cos \alpha + \frac{A}{(H + \delta - x)^n} - KH\dot{x}. \quad (430)$$

Определение аналитической зависимости для времени осаждения металломагнитных примесей путем численного интегрирования уравнения (430), табулирования решения на ЭЦВМ и графической обработки множества значений времени осаждения позволили получить исходные зависимости $T(H)$. Образец такой зависимости представлен на рисунке 82.

В логарифмических координатах зависимость $T(H)$ спрямляется. Это позволяет описать ее уравнением вида

$$T = T_{H=1}H^j, \quad (431)$$

где $T_{H=1}$ — время осаждения металломагнитной примеси при толщине слоя $H = 1$ см; оно линейно зависит от коэффициента сопротивления среды K :

$$T_{H=1} = T_{H=1} + CK; \quad (432)$$

j — угловой коэффициент, характеризующий наклон прямых $\lg T$ ($\lg H$) и определяемый выражением $j = 2,28 + 0,38n$.

Величину $T_{H=1}$ вычисляют с помощью аналитического решения уравнения (432)

$$T_{H=1} = 0,0613 - 0,0125 \lg A \approx \frac{1}{\sqrt{A}}$$

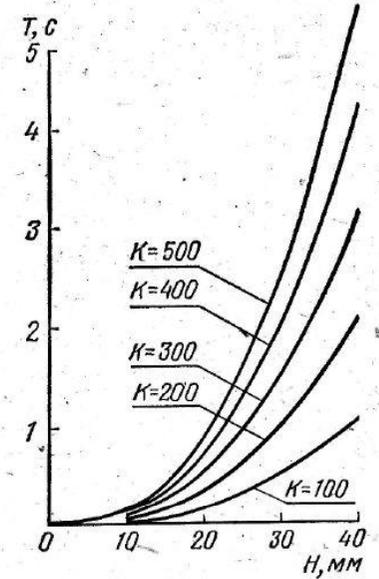


Рис. 82. Кривые зависимости времени осаждения ферромагнитной частицы от толщины слоя продукта при различных значениях коэффициента сопротивления среды.

Угловой коэффициент C определяется силовой характеристикой источника магнитного поля

$$C = 0,247A^{-0,93} \quad (433)$$

В общем случае аналитическое выражение для времени осаждения металломагнитной примеси имеет следующий вид:

$$T = H^{2,28+0,38n} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} + 0,247 KA^{-0,93} \right) \quad (434)$$

Этим соотношением определяется эффективность первой стадии процесса магнитной сепарации. Вторая стадия заключается в удерживании извлеченной металломагнитной примеси на поверхности магнитного экрана от смывания ее потоком очищенного продукта и определяется соотношением смывающей силы потока $F_{см}$ и удерживающей способности магнита F_M .

В изучаемом явлении наблюдаются две разновидности смыва металломагнитных частиц: сдвиг вдоль плоскости магнитных полюсов и срыв или отрыв от поверхности магнита в направлении движения очищаемого потока. В обоих случаях активная смывающая сила потока, ей противодействует в первом случае сила трения, определяемая произведением нормального давления на коэффициент трения частицы о поверхность магнитного экрана, а во втором — сила притяжения ферромагнитной частицы к магниту при расстоянии между ними, равном сумме толщины магнитного экрана δ и радиуса частицы r . Сдвиг может происходить в любой точке в плоскости магнитных полюсов, причем при неравномерной характеристике магнитного поля он может прекратиться в точке с большим значением силы притяжения по сравнению с тем же параметром в точке осаждения металломагнитной примеси, но достаточным для удерживания ее от смывания. Срыв происходит в конце пути ферромагнитной частицы вдоль магнитного экрана, на концевом ребре магнитного блока, причем он может произойти и в том случае, когда правильно рассчитанная система несвоевременно очищается от извлеченных металломагнитных примесей. Например, в соответствии с расчетом ферромагнитная частица, достигшая концевго ребра магнитного блока, удерживается им от смывания. Таким же образом на этом ребре останавливается и ряд других ферромагнитных частиц, но со временем наступит такой момент, когда для последующих частиц не останется места непосредственно на поверхности ребра магнитного блока, и они оседают на поверхности первых частиц, оказываясь дальше, чем первые, от поверхности магнита на расстояние $2r$. Указанное удаление может оказаться достаточным для срыва потоком этих частиц или каких-либо последующих за ними частиц, образующих «бороду».

Таким образом, расчет на смывание в форме сдвига или срыва нужно вести по силовой характеристике источника магнитного поля в точке максимального притяжения.

Условие сдвига (см. рис. 81) запишется следующим образом:

$$f_{см} \geq \text{tg } \varphi \left[\frac{A}{(\delta + r)^n} + g \cos \alpha \right],$$

а условие срыва таково:

$$f_{ср} \geq \frac{A}{(\delta + r)^n} - g \sin \alpha.$$

На эффективность процесса магнитной сепарации влияет только явление срыва.

Смывающую силу зернового потока можно определить по графику, представленному на рисунке 83. Он изображает зависимость смывающей силы потока от толщины слоя при различных значениях скорости потока. На графике проставлены также величины нагрузок, соответствующие разным значениям толщины слоя и скорости потока с учетом его разрыхленности. Все измерения смывающей силы отнесены к шарик $\varnothing 10$ мм. Исследования показали, что смывающая сила пропорциональна линейному размеру частицы. Поэтому для определения $F_{см}$, действующей на шарик $\varnothing 2r$ см, следует величину, полученную по графику $F_{см}(H)$, умножить на линейный размер частицы в сантиметрах. Зависимость смывающей силы потока от его режима определена экспериментально путем тензометрирования натяжения нити, удерживающей шарик от смывания [88].

Примеры расчета зерновых магнитных сепараторов гравитационного типа с нижним расположением магнитов. При расчете магнитных сепараторов могут встретиться различные практические задачи:

определение протяженности магнитного поля проектируемого магнитного заграждения при заданной нагрузке;

определение допустимых изменений производительности магнитного заграждения;

выявление оптимального соотношения скорости потока и толщины его слоя;

подбор источника магнитного поля для магнитного сепаратора с заданным режимом работы.

Для определения необходимой протяженности магнитного поля следует найти время осаждения металломагнитной

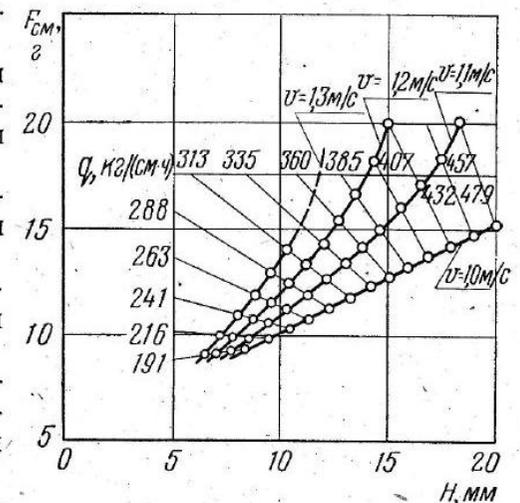


Рис. 83. Кривые зависимости смывающей силы зернового потока от толщины слоя продукта при различных значениях скорости потока

примеси по уравнению (434) и умножить его на среднюю скорость потока. Затем необходимо провести проверку по условию несмывания извлеченных металломагнитных примесей, пользуясь графиком рисунка 83.

Например, для проектирования магнитного сепаратора производительностью 6 т/ч в расчете на металломагнитные примеси $\varnothing < 4$ мм принимаем характеристику магнитного поля ($A = 10\,000$; $n = 2$). Магнит экранирован листом из диамагнитного материала толщиной $\delta = 3$ мм. Ширина очищаемого потока принята $B = 200$ мм.

По формулам (426) и (434) определим необходимую протяженность магнитного поля (l , см). Допустим, что при этом поток разовьет скорость $v = 1,1$ м/с, а толщина слоя в сечении составит 12 мм. Проверим, удержит ли магнит извлеченную ферромагнитную частицу или ее сорвет в очищенную продукцию.

Магнит удерживает частицу с силой F_M

$$F_M = m f_M = \frac{G}{g} \cdot \frac{A}{(r + \delta)^n} \approx \frac{0,25}{1000} \cdot \frac{10\,000}{0,5^2} = 10 \text{ г.}$$

По графику (см. рис. 83) для данных условий и частицы $\varnothing 10$ мм $F_{CM} = 12,5$ г. Для частицы $\varnothing 4$ мм $F_{CM} = 0,4 \cdot 12,5 = 5$ г. Таким образом, частица удержится на магнитном экране.

Нетрудно убедиться в том, что при других условиях, например при $A = 5000$ и $n = 2$, частица будет смыта потоком воздуха, так как $F_M = 5 \text{ г} < F_{CM} = 5,6 \text{ г}$.

Вторая задача может возникнуть, например, в том случае, если нужно определить, есть ли резерв повышения производительности магнитного сепаратора. Вопрос определения предельно допустимой производительности магнитного сепаратора сводится к нахождению максимальной толщины зернового потока, которую может преодолеть металломагнитная примесь при сохранении неизменными остальных параметров. При этом полагают, что скорость потока и разрыхленность слоя практически не изменяются при таком увеличении нагрузки.

Уравнение (434) связывает толщину (H) с характеристикой магнитного поля (A, n), продукта (K) и временем осаждения (T). Предельно допустимое время осаждения металломагнитной примеси определяется из соотношения (426), где скорость потока и протяженность магнитного экрана известны. Тогда искомую предельно допустимую толщину слоя очищаемого продукта можно определить по уравнению

$$H_{\max} = \sqrt[3]{\frac{l}{v \left(\frac{1}{\sqrt{A}} + 0,247KA \right)^{-0,93}}} \quad (435)$$

где $j = 2,28 + 0,38n$.

Полученное значение толщины слоя необходимо проверить на условие несмывания. Для этого нужно определить соотношение силы притяжения ферромагнитной частицы к магниту, удаленной от него на толщину магнитного экрана $F_M = m \frac{A}{(r + \delta)^n}$, и смывающей силы потока, толщиной слоя H_{\max} , скоростью v , которую можно принять независимой от толщины слоя, и размером металломагнитной примеси $2r$ (см. рис. 83).

Если условие несмывания не соблюдается, предельно допустимую толщину слоя придется снизить, спустившись по соответствующей кривой $v = \text{const}$ до уровня $F_{CM} \leq F_M$. Толщина слоя, соответствующая этой ординате, и будет искомой.

Предельно допустимую производительность магнитного сепаратора Q_D можно определить из соотношения

$$Q_{\max} = Q_D \frac{H_{\max}}{H_D}$$

Рассмотренная постановка задачи позволяет при необходимости определить причину неудовлетворительной работы магнитного сепаратора: то ли металломагнитные примеси, подлежащие извлечению, не успевают осесть на магнитный экран, то ли они оседают, но смываются потоком очищаемого продукта. Найденную причину можно устранить путем правильного подбора параметров работы сепаратора.

Третья задача относится к определению оптимального соотношения скорости и толщины слоя зернового потока, обеспечивающих максимальную эффективность работы магнитного сепаратора, которой соответствует минимальный путь осаждения металломагнитной примеси при наименьшем значении смывающей силы потока.

Рассмотрим решение этой задачи при помощи графика (рис. 84). Здесь в координатах $q - H$ нанесены кривые $F_{CM} = 20, 15, 10 \text{ г} = \text{const}$, полученные графически по зависимости $F_{CM}(H)$ (см. рис. 83). Эти кривые характеризуют режимы зерновых потоков при различных сочетаниях нагрузки и толщины слоя, развивающие смывающую силу указанной величины.

Определим, при каком значении толщины слоя в магнитном сепараторе с протяженностью

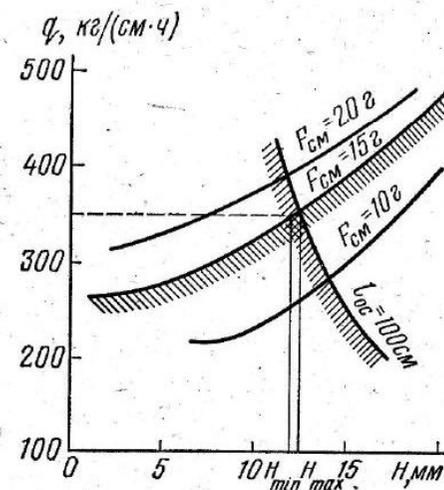


Рис. 84. Графическое определение оптимальных параметров магнитного сепарирования.

магнитного фронта $l = 100$ см и нагрузкой $q = 350$ кг/(см·ч) металломагнитные примеси, удерживаемые магнитом с заданной характеристикой с силой в 15 г, успеют пройти через слой к магнитному экрану и не окажутся смытыми потоком зерна.

Условие несмывания отвечает зона, заштрихованная под кривой $F_{см} = 15$ г.

Минимальная толщина слоя при заданной нагрузке, гарантирующая несмывание, равна 1,2 см. При меньшей толщине слоя поток разовьет большую скорость, которая приведет к срыву извлеченных металломагнитных примесей.

Условие осаждения металломагнитной примеси соответствует зона, заштрихованная под кривой $l_{ос} = 100$ см. Толщину слоев, выходящих за пределы этой зоны, верхние ферромагнитные частицы не успевают пройти. Кривая построена по уравнению

$$q = \frac{l\gamma}{N^{j-1} \left(\frac{1}{\sqrt{A}} + 0,247KA^{-0,93} \right)}, \quad (436)$$

где γ — объемная масса продукта, кг/м³.

Максимально допустимая толщина слоя по условию осаждения равна 1,25 см. Очевидно, что рассматриваемый сепаратор работает на пределе.

Диапазон допустимого изменения толщины слоя составляет 0,5 мм. При нагрузке, равной 300 кг/(см·ч), этот диапазон увеличился бы до 6 мм (см. рис. 84), что обеспечило бы более устойчивый режим работы.

Анализ кривых $F_{см} = \text{const}$ и $l_{ос} = \text{const}$ показывает, что поставленная задача на оптимум не решается, так как в рассматриваемом диапазоне параметры процесса не имеют экстремальных точек.

Четвертая задача относится к подбору источника магнитного поля для сепаратора с заданным режимом работы. Такая постановка задачи возможна в том случае, если в распоряжении конструктора есть ряд источников магнитного поля с характеристиками (A_1n_1) , (A_2n_2) , (A_3n_3) и т. д. В этом случае можно рекомендовать решение методом подбора по схеме, разобранной для первой задачи, т. е. определить путь осаждения металломагнитной примеси для нескольких источников магнитного поля, из полученных решений выбрать наиболее приемлемый вариант и проверить его на несмывание.

Анализ разобранных решений ряда практических задач свидетельствует о том, что все они сводятся к одной схеме: определение времени осаждения металломагнитной примеси по уравнению (434) и проверка полученного решения на несмывание при помощи графика (см. рис. 83).

§ 2. Определение силы притяжения металломагнитных примесей

В практике конструирования и эксплуатации магнитных аппаратов часто необходимо в первом приближении определить силу притяжения магнитов. Для этого пользуются упрощенным способом расчетов по схеме, представленной на рисунке 85 [78]. При этом предполагают, что частица уже достигла магнитного экрана, а смывающее действие потока продукта в расчет не принимают.

Сила притяжения металломагнитных примесей в сепараторах с нижним расположением магнитов. Для удержания частицы на наклонном магнитном поле должно соблюдаться условие $F_{тр} > T$, при этом $F_{тр} = fN_1$, а

$$N_1 = F_M + N = F_M + G \cos \alpha, \quad (437)$$

где f — коэффициент трения ферромагнитной частицы о плоскость; N и T — соответственно нормальная и касательная составляющие силы тяжести; N_1 — нормальная реакция.

После подстановки значений N и T получим

$$(G \cos \alpha + F_M)f > G \sin \alpha,$$

откуда

$$F_M \geq \frac{G}{f} \sin \alpha - G \cos \alpha = G \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \varphi}, \quad (438)$$

где φ — угол трения.

Это условие справедливо для статического положения частицы, в реальных же условиях она движется по наклонной плоскости с определенной скоростью, поэтому для остановки ее и удержания на магнитном экране требуется большая сила.

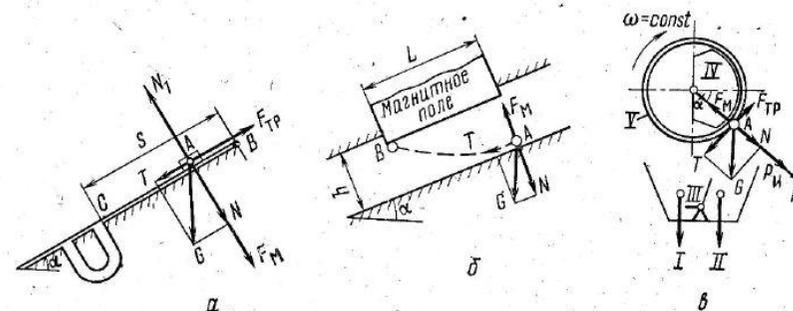


Рис. 85. Расчетные схемы для определения силы притяжения металломагнитных примесей:

a — с нижним расположением магнитов; b — с верхним расположением магнитов; c — в сепараторах барабанного типа; I — металломагнитные примеси; II — очищенный продукт; III — поворотный клапан; IV — магнитная система; V — обечайка барабана.

Если допустить, что магнитная сила, нормальная к плоскости, изменяется незначительно по длине поля, то полная работа сил трения от F_M и N на пути S составит

$$A = F_M f S + N f S = F_M f S + G S f \cos \alpha.$$

Предположим, что частица начинает свой путь по экрану в точке B (рис. 85, a). Ускорение, с которым она движется по плоскости, $a = g(\sin \alpha - f \cos \alpha)$, а скорость в точке C составит

$$v = \sqrt{2Sa} = \sqrt{2Sg(\sin \alpha - f \cos \alpha)},$$

тогда кинетическая энергия E будет равна

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{G}{g} \cdot \frac{v^2}{2} = GS(\sin \alpha - f \cos \alpha). \quad (439)$$

Работа силы тяжести A_T составит

$$A_T = TS = GS \sin \alpha.$$

Учитывая, что на пути S работа сил трения равна кинетической энергии и работе силы тяжести, запишем

$$A = A_T + E;$$

$$F_M f S + G S f \cos \alpha = GS(\sin \alpha - f \cos \alpha) + GS \sin \alpha, \quad (440)$$

откуда после несложных преобразований получим

$$F_M = \frac{2G}{f} (\sin \alpha - f \cos \alpha) = 2G \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \varphi}. \quad (441)$$

Из формулы (441) следует, что сила притяжения, необходимая для остановки и удержания ферромагнитной частицы, примерно вдвое больше силы, требуемой для удержания частицы.

Сила притяжения металломагнитных примесей в сепараторах с верхним расположением магнитов. При верхнем расположении магнитов сила трения ферромагнитных частиц в зоне магнитного поля равна нулю, так как магнитная сила F_M отделяет их от плоскости (рис. 85, b). Частица начинает перемещаться в направлении, перпендикулярном наклонной плоскости, когда F_M превышает нормальную составляющую силы тяжести N (сопротивление среды здесь не учитывается).

Разность этих сил

$$P = F_M - N = F_M - G \cos \alpha \quad (442)$$

сообщает частице ускоренное движение.

Обозначив через t_1 время, за которое ферромагнитная частица пройдет путь L по наклонной плоскости в зоне магнитного поля, запишем

$$L = \frac{gt_1^2}{2} \sin \alpha + v_0 t_1, \quad (443)$$

где v_0 — скорость частицы при входе в зону магнитного поля.

Это время должно быть больше или равно времени t_2 , за которое частица пройдет путь h под действием силы P , в противном случае частица не будет удалена из потока продукта. Если допустить, что частица под действием силы P движется равноускоренно ($P = \text{const}$), то можно записать

$$h = \frac{Pt_2}{m \cdot 2}. \quad (444)$$

Приняв $t_1 \geq t_2$ с учетом уравнений (442) и (443), найдем значение силы $P = F_M - N$, которую нужно создать для выделения металломагнитных примесей.

$$L = \frac{ghm}{P} \sin \alpha + v_0 \sqrt{\frac{2hm}{P}};$$

$$\frac{2hm^2}{P} v_0 = L^2 - \frac{2LGh}{P} \sin \alpha + \frac{G^2 h^2}{P^2} \sin^2 \alpha.$$

или после преобразований получим

$$P^2 - P \frac{2h}{L^2} (GL \sin \alpha + mv_0^2) + \frac{G^2 h^2 \sin^2 \alpha}{L^2} = 0. \quad (445)$$

Откуда

$$P = \frac{h}{L^2} (GL \sin \alpha + mv_0^2) \pm \sqrt{\frac{h^2}{L^2} (GL \sin \alpha + mv_0^2)^2 - \frac{G^2 h^2 \sin^2 \alpha}{L^2}}, \quad (446)$$

или, после преобразований и подстановок получим

$$F_M = P + N = G \cos \alpha + \frac{h}{L^2} (GL \sin \alpha + mv_0^2) \pm v_0 \sqrt{m(2GL \sin \alpha + mv_0^2)}. \quad (447)$$

При $\alpha = 0$, например, в ленточных магнитных сепараторах с верхним расположением магнитов

$$F_M = G + \frac{2h}{L^2} mv_0^2 \text{ или } f_m = g + \frac{2hv^2}{L^2}. \quad (448)$$

Второе решение для $F_M = G + \frac{h}{L^2}$ нереально для процесса сепарирования.

Из зависимостей (448) видно, что сила F_M , необходимая для удаления ферромагнитной частицы из потока продукта, расходуется на преодоление силы ее тяжести и кинетической энергии. Величина прямо пропорциональна расстоянию между полюсами набора магнитов и сепарирующей поверхностью и обратно пропорциональна длине магнитного поля в квадрате.

Сила притяжения металломагнитных примесей в сепараторах барабанного типа. В сепараторе барабанного типа ферромагнитная частица, попавшая на вращающуюся немагнитную обечайку, притягивается к ней магнитным полем электромагнита, установленного внутри барабана, и вращается с ней до выхода из зоны магнитного поля, где открывается и попадает в бункер для сбора металломагнитных примесей (рис. 80, в, 85, в).

Условие движения частицы вместе с обечайкой барабана (см. рис. 85, в) запишется как

$$T \leq F_{тр} \text{ или } G \cos \alpha \leq (F_M - N - P_{и})f, \quad (449)$$

где $P_{и} = m\omega^2 R$ — сила инерции в переносном движении; $F_{тр}$ — сила трения; T и N — составляющие силы тяжести, $N_1 = F_M - N - P_{и}$ — нормальная реакция.

После преобразования и подстановки получим

$$F_M \geq \frac{G \cos \alpha}{f} + G \sin \alpha + P_{и} = G \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\sin \varphi} + P_{и}. \quad (450)$$

Максимальная сила притяжения F_M с учетом конструкции современных сепараторов должна рассчитываться для зоны $\alpha \approx 80-100^\circ$, т. е. в том положении, когда ферромагнитная частица проходит кромку разделяющего клапана (см. рис. 85, в).

Эти зависимости справедливы только для расчетов первого приближения, поскольку они не учитывают сопротивление среды, взаимодействия ферромагнитных частиц между собой, смывающее влияние потока и другие факторы, значительно изменяющие картину сепарирования.

Глава 9. ТРИЕРОВАНИЕ

В процессе триерования зерновую массу разделяют на две фракции, отличающиеся размерами зерновок по длине. Триерами из зерновой смеси выделяют короткие (куколь, гречишка, битые зерна) и длинные (овес, овсюг) фракции. Рабочие элементы триеров — это ячеистые поверхности с определенной формой и размерами ячеек. Ячеистым поверхностям сообщают вращательное или сложное движение, в процессе которого разделяемая смесь перемещается по рабочей поверхности: короткие фракции укладываются в ячейки и выпадают в определенной зоне, а длинные фракции удаляются сходом по ячеистой поверхности.

Наиболее распространены на зерноперерабатывающих предприятиях и в сельскохозяйственном производстве цилиндрические

и дисковые триеры. Лопастные триеры сейчас наша промышленность не выпускает, а цилиндрические ситовые ленточные триеры подготавливают к серийному производству заводы сельскохозяйственного машиностроения. Триеры с наружной цилиндрической ячеистой поверхностью, ленточные, с внутренним расположением лопастей не применяют в связи с их более низкими технико-экономическими показателями и рядом конструктивных недостатков.

Цилиндрические триеры благодаря простоте конструкции и эксплуатационной надежности применяют на зерноперерабатывающих предприятиях, особенно в сельскохозяйственном производстве. Дисковые триеры используют на мукомольных предприятиях как технологически наиболее эффективные.

§ 1. Цилиндрические триеры

Зерновая смесь, непрерывно поступающая во вращающийся цилиндр триера, образует в нижней его части слой зерновок, из которого ячейки постоянно выносят короткие фракции. Длинные фракции перемещаются в осевом направлении. Короткие фракции, выбранные из слоя, выпадают из ячеек в шнековый желоб.

Длинные фракции непрерывно движутся вокруг ядра слоя. Часть их силой трения увлекается на достаточно большую высоту, и они выпадают на слой зерен, в результате чего зерно перемешивается. Иногда длинные зерна заносятся настолько высоко, что попадают в зону выпадения коротких фракций, ухудшая качество сепарации.

Точное математическое описание процесса триерования с учетом разнообразия форм и размеров зерновок, ориентацией их в ячейках при выносе коротких фракций, отрыве от несущей ячеистой поверхности под действием сил инерции, трения, тяжести в зависимости от кинематического режима триера и физико-механических свойств зерновой смеси очень сложно. Поэтому рассмотрены теоретические предпосылки с рядом допущений, позволяющих, однако, достаточно точно характеризовать действительный процесс и получить необходимые данные для расчета и конструирования триеров [48, 63].

Движение зерновой смеси внутри вращающегося цилиндра можно подразделить на следующие стадии:

относительный покой зерновой смеси (движение зерна вместе с цилиндром);

относительное движение зерна;

свободное движение зерна после отрыва от несущей поверхности.

При этом следует учитывать, что условия движения зерновок в ячейках и зерновок, не попавших в ячейки, различны.

Движение зерна, не попавшего в ячейку, по несущей триерной поверхности. В цилиндре триера (рис. 86, а), вращающемся с по-

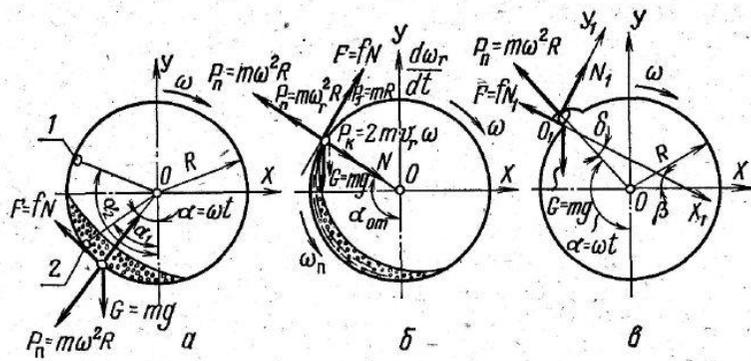


Рис. 86. Схема сил, действующих на зерновку, к определению условий: ее относительного покоя и скольжения (а), отрыва ее от несущей поверхности (б), ее движения при попадании в ячейку (в):

1 — отрыв частицы; 2 — скольжение частицы.

стоянной угловой скоростью, изолированная зерновка находится под действием силы тяжести $G = mg$, силы инерции $P_n = m\omega^2 R$, нормальной реакции N и силы трения $F = fN$. Состояние относительного покоя зерновки можно описать уравнениями

$$N = m\omega^2 R + mg \cos \omega t; \quad (451)$$

$$F = fm(\omega^2 R + g \cos \omega t) = fmg \left(\frac{\omega^2 R}{g} + \cos \omega t \right). \quad (452)$$

Момент начала относительного движения зерна вниз по вращающемуся цилиндру зависит от некоторого угла α_1 , определяемого из условия

$$f(\omega^2 R + g \cos \alpha_1) = g \sin \alpha_1.$$

После подстановки $f = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi}$ и преобразований получим

$$\sin(\alpha_1 - \varphi) = \frac{\omega^2 R}{g} \sin \varphi$$

или

$$\alpha_1 = \varphi + \arcsin \left(\frac{\omega^2 R}{g} \sin \varphi \right). \quad (453)$$

Частоту вращения триерного цилиндра, соответствующую началу скольжения зерновок, можно получить из выражения

$$\frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\sin(\alpha_1 - \varphi)}{\sin \varphi}; \quad \omega^2 = \frac{g}{R} \cdot \frac{\sin(\alpha_1 - \varphi)}{\sin \varphi}$$

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin(\alpha_1 - \varphi)}{r \sin \varphi}}. \quad (454)$$

Относительное движение зерновок по цилиндру начинается всегда раньше, чем они смогут оторваться от поверхности триера. Действительно, момент отрыва покоящейся зерновки, определяемый углом α_2 , возможен при условии

$$N = m\omega^2 R + mg \cos \alpha_2 = 0,$$

откуда

$$\cos \alpha_2 = -\frac{\omega^2 R}{g}, \quad \alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \arcsin \left(\frac{\omega^2 R}{g} \right). \quad (455)$$

При сравнении формул (453) и (455) видно, что α_1 может быть равен α_2 только в случае, если $\varphi = \frac{\pi}{2}$, что практически невозможно. В действительности всегда $\varphi < \frac{\pi}{2}$ и $\alpha_1 < \alpha_2$.

В неподвижном цилиндре ($\omega = 0$) $\alpha \leq \varphi$, что характеризует возможное положение уровня зерна в покоящемся цилиндре. Естественно, что для сохранения состояния относительного покоя зерна на большем угле поворота выражение $\frac{\omega^2 R}{g}$ должно быть большим. Это выражение часто называют показателем кинематического режима и обозначают K . По-видимому, есть такое значение угловой скорости ω_{\max} , при котором зерновка будет постоянно двигаться с поверхностью цилиндра без скольжения. Определим это значение дифференцированием функции $\frac{\omega^2 R}{g} = \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sin \varphi}$ по α и приравниванием производной нулю

$$\frac{d \left(\frac{\omega^2 R}{g} \right)}{d \alpha_1} = \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\sin \varphi} = 0.$$

Отсюда $\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi$ подставим в значение функции и получим

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{g}{R \sin \varphi}}.$$

При одинаковых конструктивных размерах рабочего цилиндра триера ω_{\max} зависит только от угла трения зерновок.

Для определения момента отрыва зерновки от несущей триерной поверхности часто пользуются уравнением (455). Однако, как было показано ранее, отрыв зерновки происходит уже после скольжения зерна по триерной поверхности. В связи с этим схема сил, действующих на зерновку в момент отрыва, изменяется и в первую очередь из-за относительного ускорения и ускорения Кориолиса. Рассмотрим момент отрыва зерновки с учетом сказанного. К ранее рассмотренной схеме сил, действующих на зерновку,

следует добавить (рис. 86, б) силы инерции, возникающие при относительном движении зерновки (скольжение по триерной поверхности)

$$P_n = m\omega_r^2 R; \quad P_\tau = m a_r^\tau = mR \frac{d\omega_r}{dt}$$

и силу инерции от ускорения Кориолиса $P_K = 2m v_r \omega = 2mR\omega_r \omega$. Тогда условие равновесия зерновки можно записать в виде

$$N = m\omega^2 R + m\omega_r^2 R + mg \cos(\omega t - \psi) - 2mR\omega_r \omega; \quad (456)$$

$$T = F + P_\tau = fm[\omega^2 R + \omega_r^2 R + g \cos(\omega t - \psi) - 2\omega_r R \omega] + mR \frac{d\omega_r}{dt},$$

где ω_r — относительная угловая скорость зерновки; ψ — угол, соответствующий перемещению зерновки в относительном движении.

Как уже было сказано, момент отрыва зерновки от несущей поверхности определяется условием $N = 0$, т. е.

$$\omega^2 R + \omega_r^2 R + g \cos(\omega t - \psi) - 2R\omega_r \omega = 0. \quad (457)$$

Решая это уравнение относительно ω_r , получим

$$\omega_r = \omega \pm \sqrt{-\frac{g}{R} \cos(\omega t - \psi)}. \quad (458)$$

Учитывая противоположные направления переносной ω и относительной ω_r угловых скоростей, запишем значение абсолютной угловой скорости зерновки

$$\omega_a = \omega - \omega_r = \pm \sqrt{-\frac{g}{R} \cos(\omega t - \psi)}. \quad (459)$$

В формулах (458), (459) верхние знаки будут соответствовать спуску зерновки, нижние — подъему. Очевидно, что отрыв зерновки может быть только при ее подъеме. Для определения угла отрыва $\alpha_{от}$ решим уравнение (457). Положение зерновки для некоторого момента времени определяется углом $\alpha_{от} = \omega t - \psi$,

где $\psi = f(t)$ определяет угол относительного перемещения зерновки по несущей триерной поверхности

$$g \cos(\omega t - \psi) = -R(\omega^2 + \omega_r^2 - 2\omega_r \omega) \quad (460)$$

или

$$\cos \alpha_{от} = -\frac{R}{g} (\omega - \omega_r)^2$$

$$\text{и } \alpha_{от} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{R}{g} (\omega - \omega_r)^2. \quad (461)$$

Учитывая, что аналитическое решение для определения угла ψ хотя и возможно, но представляет собой известную трудность, удобнее воспользоваться опытными данными об определении относительной скорости зерновки. Зная величину ω_r , легко определить значение угла.

В практике конструирования для расчетов первого приближения все же пользуются при определении угла отрыва формулой (455), без учета ω_r .

Выведенные зависимости дают возможность определить характер движения изолированных длинных зерновок, не попавших в ячейки триерной поверхности.

Движение зерна, попавшего в ячейку, по несущей триерной поверхности. Определим положение несущей стенки ячейки углом δ между несущей стенкой и радиусом цилиндра (рис. 86, в). Этот угол по абсолютной величине не изменяется во времени, а зависит от формы и ориентации штампованных ячеек на триерной поверхности. Наибольшие линейные размеры зерновок в сопоставлении с размерами рабочего триерного цилиндра позволяют пренебречь ими при дальнейших аналитических расчетах.

Рассмотрим условие равновесия зерновки в ячейке. За подвижную систему координат примем $X_1 O_1 Y_1$ и запишем уравнения суммы сил в проекциях на оси координат, приравняв их нулю,

$$-m\omega^2 R \cos \delta - fN_1 + mg \cos[180^\circ - (\alpha - \delta)] = 0; \quad (462)$$

$$m\omega^2 R \sin \delta + N_1 - mg \sin[180^\circ - (\alpha - \delta)] = 0. \quad (463)$$

Определим нормальную реакцию N_1 из второго уравнения и подставим ее значение в первое

$$N_1 = mg \sin(\alpha - \delta) - m\omega^2 R \sin \delta; \\ m\omega^2 R \cos \delta + fm[g \sin(\alpha - \delta) - \omega^2 R \sin \delta] + mg \cos(\alpha - \delta) = 0.$$

После несложных преобразований и подстановки $f = \operatorname{tg} \varphi$

$$\frac{\omega^2 R}{g} (\cos \varphi \cos \delta - \sin \varphi \sin \delta) = \\ = -[\sin \varphi \sin(\alpha - \delta) + \cos \varphi \cos(\alpha - \delta)]; \\ \cos(\varphi + \delta - \alpha) = -\frac{\omega^2 R}{g} \cos(\varphi + \delta).$$

И окончательно

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi + \delta + \arcsin \left[\frac{\omega^2 R}{g} \cos(\varphi + \delta) \right]. \quad (464)$$

В современных цилиндрических триерах со штампованными ячейками угол δ близок нулю, в связи с чем выражение (464) принимает более простой вид

$$\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi + \arcsin\left(\frac{\omega^2 R}{2} \cos \varphi\right). \quad (465)$$

Этими выражениями можно воспользоваться для определения угла выпадения зерновки из ячейки, рассчитывая положение желоба для вывода отсепарированных мелких фракций.

Если рассмотреть возможность выпадения частиц из ячеек при неподвижном цилиндре, то можно легко установить (см. рис. 86, в), что необходимым условием будет $\varphi > \beta$, где φ — угол трения зерновки в состоянии покоя.

В свою очередь, угол β зависит от ориентации несущей кромки и ее положения, определяемого углом α . Во вращающемся цилиндре благодаря действию на частицы центробежных сил инерции переносного движения и сил трения выпадение частиц при прочих равных условиях всегда будет определяться большим углом α , что и следует из выражения (465).

Цилиндрические триеры с прямолинейными качаниями. В последнее время среди разнообразных конструкций цилиндрических триерных устройств некоторые зарубежные фирмы стали выпускать триеры с прямолинейными качаниями цилиндра вдоль его оси.

Дополнительные колебания цилиндра оказывают следующие влияния на процесс сепарации в триере:

угол подъема зернового слоя уменьшается в результате интенсификации движения зерновой смеси и уменьшения коэффициентов динамического трения. Слой располагается в более нижней части цилиндра, что создает лучшие условия заполнения ячеек и повышает эффективность разделения;

повышается вероятность попадания зерновок в ячейки благодаря лучшему перемешиванию сепарируемой смеси и перераспределению нагрузки по длине цилиндра;

угол выпадения зерновок из ячеек уменьшается, что обеспечивает возможность более полного улавливания короткой фракции. Положение желоба для отсепарированных мелких фракций можно устанавливать по наименьшему углу выпадения коротких фракций.

Если величина силы инерции переменного колебательного движения цилиндра будет достаточно большой, то вероятность попадания и устойчивого равновесия длинных зерновок в ячейках почти полностью исключается. Для сдвига зерновки необходимо, чтобы

$$m\omega_k^2 A_k \geq fN,$$

где ω_k — угловая частота колебательного движения, s^{-1} ; A_k — амплитуда колебаний, м.

Опытным путем было установлено, что ни частота, ни амплитуда колебаний в отдельности существенно на процесс разделения не влияют, все зависит от абсолютной величины осевой силы инерции. Колебательное движение увеличивает коэффициент использования триерной поверхности, а следовательно, и производительность на 30—40%. Триеры такого типа применяют большей частью там, где требуется высокое качество сепарирования, например при обработке семенного материала.

§ 2. Дисковые триеры

Процесс сепарирования зерновой смеси в дисковом триере, где короткие фракции выбирают при помощи дисков с ячейками, расположенными концентрическими кругами, отличен от процесса в цилиндрическом триере. Рабочий орган дискового триера — блок дисков (несколько десятков), смонтированных на горизонтальном валу, заключен в металлический корпус. Заполнение ячеек зернами (рис. 87) происходит в основном в квадранте I и частично в квадранте IV. Часть длинных зерен также попадает в ячейки, однако в силу неустойчивого равновесия они выпадают в квадранте II. Короткие фракции в ячейках перемещаются до квадранта III, где меняется ориентация ячейки. При повороте диска на некоторый угол α равновесие сил, действующих на зерновку, нарушается, и она выпадает из ячейки на приемный лоток для коротких фракций. Так как ячейки расположены на концентрических окружностях, то углы выпадения зерновок различны для каждой окружности.

На рисунке 87, б приведены зоны выпадения зерновок ржи на стандартных дисках с ячейками размером 8,75 мм в зависимости

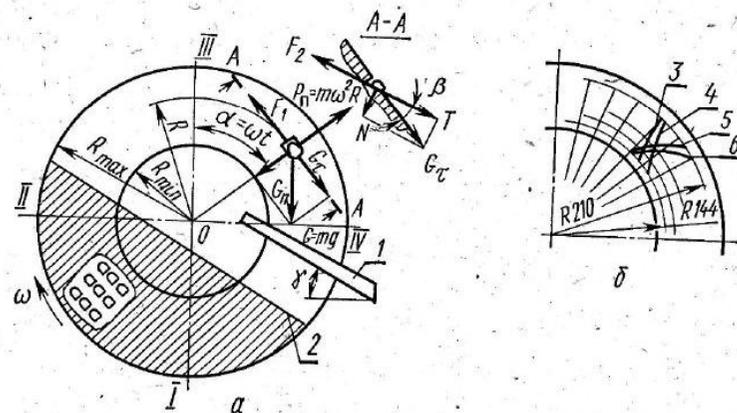


Рис. 87. Схема сил, действующих на зерновку, к определению условий выпадения ее из ячейки дискового триера (а) и границы зон выпадения (б):

1 — приемный лоток для коротких фракций; 2 — уровень зерновой смеси; 3 — $n=60$ об/мин; 4 — $n=52$ об/мин; 5 — $n=70$ об/мин; 6 — $n=80$ об/мин.

от кинематического режима работы триера, полученные экспериментальным путём. Как видно из рисунка, с увеличением скорости вращения дисков пограничные кривые смещаются книзу, уменьшая зону выпадения.

Рассмотрим некоторые теоретические предпосылки к определению углов выпадения коротких фракций. Зерновка, попавшая в ячейку (см. рис. 87, а), положение которой определено радиусом-вектором R , находится под действием следующих сил, условно приложенных к центру тяжести зерновки: силы инерции переносного движения $P_{\pi} = m\omega^2 R$, силы тяжести $G = mg$ и сил трения F_1 и F_2 . Силу тяжести в плоскости диска разложим на нормальную и касательную составляющие — G_n и G_{τ} . В зависимости от соотношения сил P_{π} и G_n зерновка будет прижиматься к внутренней $P_{\pi} < G_n$ или наружной $P_{\pi} > G_n$ боковой грани ячейки. Выпадение зерновки происходит в плоскости $A-A$, перпендикулярной к плоскости диска. Здесь на зерновку действуют такие силы:

$T = G_{\tau} \cos \beta = G \sin \alpha \cos \beta$ — составляющая силы тяжести, выталкивающая зерновку из ячейки;

$F_2 = fmg \sin \alpha \sin \beta$ — сила трения о направляющую поверхность ячейки;

$F'_1 = fm(\omega^2 R - g \cos \alpha)$ — сила трения о наружную боковую поверхность ячейки, когда $\omega^2 R > g \cos \alpha$;

$F''_1 = fm(g \cos \alpha - \omega^2 R)$ — сила трения о внутреннюю боковую поверхность ячейки, когда $\omega^2 R < g \cos \alpha$.

Равновесие зерновки в ячейке сохраняется до момента, когда $F_1 + F_2 = T$, и зависит от расположения ячеек, определяемого радиусом R , и кинематического режима работы триера $K =$

$\frac{\omega^2 R}{g}$. Следует помнить о том, что режим работы современных дисковых триеров охватывает оба случая: $K > \cos \alpha$ и $K < \cos \alpha$. Действительно, в триерах типа ЗТК, ЗТО и опытных образцах УТК-6 и ЗТО-М $R_{\max} = 315$ мм и $R_{\min} = 190$ мм, угловая частота $\omega = 5,45$ с⁻¹, соответственно $K_{\max} = 0,97$ и $K_{\min} = 0,57$. Угол выпадения коротких фракций для триеров этого типа рассчитывают в пределах $\alpha_B = 35-45^\circ$, что соответствует значению $\cos \alpha_B = 0,82-0,71$, т. е. ряды ячеек, расположенных ближе к оси вращения, подчиняются условию $K < \cos \alpha$, а ячейки, удаленные к периферии, — условию $K > \cos \alpha$.

Запишем условие равновесия частицы в общем случае

$$fm[g \sin \alpha \sin \beta \pm (\omega^2 R - g \cos \alpha)] = g \sin \alpha \cos \beta. \quad (466)$$

После подстановки $f = \operatorname{tg} \omega$, $K = \frac{\omega^2 R}{g}$ и преобразований получим

$$\pm (K - \cos \alpha) = \sin \alpha \frac{\cos(\varphi - \beta)}{\sin \varphi}. \quad (467)$$

Из этого выражения можно определить как углы выпадения зерновок α_B , так и угловую скорость триерного диска с учетом за-

данных или выбранных из конструктивных соображений углов выпадения. Для определения углов α_B преобразуем выражение (467), введя обозначения

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\cos(\varphi + \beta)}{\sin \varphi},$$

$$K = \frac{\cos \alpha \cos \rho \pm \sin \alpha \sin \rho}{\cos \rho}$$

или

$$K \cos \rho = \cos(\alpha \pm \rho).$$

Отсюда окончательно

$$\alpha_B = \pm \left[\rho + \arccos \left(\frac{\omega^2 R}{g} \cos \rho \right) \right]. \quad (468)$$

При $K > \cos \alpha$ в формуле следует брать знак «плюс» и соответственно при $K < \cos \alpha$ — «минус». При $K = 1$ и, следовательно, $K \geq \cos \alpha$ формула (468) приобретает вид $\alpha_B = \rho \pm \rho$, т. е. α_B равно либо нулю, либо 2ρ . Определим для примера приближенное значение $\rho = \operatorname{const}$ для угла трения зерновки в ячейке $\varphi = 30^\circ$ и угла $\beta = 45^\circ$:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{\cos(30^\circ + 45^\circ)}{\sin 30^\circ} = 0,52 \text{ или } \rho \approx 27^\circ.$$

Угол выпадения $\alpha_B = 0$ при сравнительно высоких скоростях ($K = 1$) маловероятен, поэтому реальным будет второе значение $\alpha_B = 54^\circ$. Большой угол выпадения зерновок свидетельствует о высоком кинематическом режиме. Высокая угловая скорость задерживает выпадение зерновок из ячеек. Значение ее может быть таким, что зерновки совсем не будут выпадать из ячеек.

Предельную частоту вращения диска определяют из выражения (466)

$$n_{\text{пр}} \leq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{R_{\max}} \left[\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi} \cos(\varphi + \beta) + \cos \alpha \right]}. \quad (469)$$

Определим значение $n_{\text{пр}}$ при ранее принятых условиях: $\varphi = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$, допустимый угол выпадения зерновки примем $\alpha_B = 45^\circ$. Тогда

$$n_{\text{пр}} \leq 9,55 \sqrt{\frac{9,8}{0,315} \left[\frac{\sin 45^\circ}{\sin 30^\circ} \cos 75^\circ + \cos 45^\circ \right]} \approx 55,5 \text{ об/мин.}$$

Частота вращения дисков в серийно выпускаемых триерах составляет 50—55 об/мин. Зерновка, выпав из ячейки, совершает свободное падение в плоскости, расположенной под некоторым

углом к плоскости диска. Положение плоскости определяется углом выпадения зерновки α_v , начальной скоростью зерновки в момент отрыва v_0 , углом β и радиусом-вектором R . Начальная скорость зерновки

$$v_0 = \omega R + v_r,$$

где v_r — относительная скорость зерновки в ячейке, составляющая, по данным А. Е. Лурье, 0,1—0,2.

Зерновки, выпадающие из ячеек, попадают в приемный лоток для коротких фракций, угол установки ν которого должен обеспечить надежное их транспортирование и вывод в сборный конус. Это условие выполняется при $\nu > \varphi_1$, где φ_1 — угол трения зерновки о приемный лоток.

С увеличением угловой скорости дисков возрастает производительность, однако, как ранее было отмечено, ухудшаются условия выпадения коротких фракций. Обстоятельство, улучшающее условия выпадения частиц, при более высокой угловой скорости, — это уменьшение коэффициента трения зерновки в ячейке, достигаемое высоким качеством обработки ее внутренней поверхности.

Глава 10. ПРОЦЕССЫ СЕПАРИРОВАНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ОЧИСТКИ ЗЕРНА

В данной главе рассмотрен общий принцип построения технологических линий очистки зерна, предназначенных для извлечения примесей, которые по свойствам нуждаются в применении нескольких способов сепарирования.

Традиционные технологические схемы машин, применяемых в этом случае на зерноперерабатывающих предприятиях, удобно показать на примере воздушно-ситовых сепараторов типа ЗСМ и ЗСП.

Исходная зерновая смесь последовательно проходит через воздушные каналы и систему сит таким образом, что сначала в первом пневмосепарирующем канале отделяется часть легких примесей, затем на приемном сите отделяются грубые примеси, далее зерновая смесь поступает на сортировочные сита, где сходом отделяются крупные примеси, а из оставшейся зерновой смеси на ситах, лежащих ниже, проходом извлекаются мелкие примеси, и вновь все зерно проходит через второй пневмосепарирующий канал для очистки от легких примесей. Эффективность машины оценивают коэффициентами извлечения каждой характерной примеси, причем содержание зерна в отходах не должно превышать 2% от их массы. Так как общее количество извлеченных примесей обычно не превышает нескольких процентов от количества исходной смеси, то практически можно считать, что каждая примесь отде-

ляется от всей зерновой массы. Снижение удельных нагрузок на рабочие органы в результате создания параллельных потоков не меняет принципиальную технологическую схему машины; ситовые каналы для отделения крупных примесей используются только на $1/4$ — $1/3$ своей длины, извлечение наиболее трудноотделимых примесей (мелких) также не отвечает требованиям высокой эффективности. Кроме того, расположение сит различного назначения в одном корпусе не позволяет установить разные кинематические параметры, оптимальные для извлечения каждой примеси.

Возможность оптимизации процесса при такой технологической схеме ограничена не только самой схемой, но и условиями компоновки рабочих органов при ее осуществлении в одной машине. Результаты этого — невысокая эффективность процесса по всем видам примесей, даже при использовании по основному назначению: очистке пшеницы. Это заставляет применять последовательно двух- и трехкратную обработку зерновой смеси на сепараторах одного и того же типа для того, чтобы снизить засоренность до норм или требований к ведению технологического процесса.

Еще ниже в этих машинах эффективность сепарирования крупных и других зерновых смесей и культур, так как невозможно установить кинематические режимы соответственно специфическим свойствам разделяемых компонентов.

Поэтому во многих случаях для очистки зерновой смеси от примесей, разнородных по физико-механическим свойствам, целесообразно применять технологические линии с поэтапным фракционированием смеси. Дополнительное достоинство такой схемы, кроме высокого эффекта очистки, — это возможность получить две и более фракции очищенного зерна с различными свойствами, что при их дальнейшей отдельной обработке, например измельчении или шелушении, даст возможность установить разные оптимальные режимы.

Первоначально рассмотрим простой вариант схемы, предназначенной для очистки зерна только от двух видов примесей, причем основной признак отличия от зерновок частиц первой примеси — это, например, их большая длина, а частиц второй примеси — большая плотность. Так как разделить смесь на три фракции одним способом сразу невозможно, то на первом этапе фракционирования можно предложить разделение исходной смеси на три фракции, из которых одна — это зерно необходимых кондиций по содержанию каждой примеси (или обеих вместе), а каждая из двух других фракций — промежуточная и представляет собой смесь зерна только с одной примесью. В этом случае вторым этапом фракционирования будет извлечение годного зерна из промежуточных фракций для присоединения его к зерну, выделенному на первом этапе так, чтобы сохранилось его осредненное качество в пределах кондиции, а содержание годного зерна в отходах не превысило допустимой нормы. Достоинства такой схемы заключаются в следующем.

Из трех машин только одна, установленная на первом этапе, должна иметь высокую производительность и развитую технологическую схему. Рабочие органы двух других машин могут иметь различные принципы действия, а параметры процесса в них настроены на оптимальный режим в зависимости от состава смесей и силы признаков различия частиц компонентов.

Возможен и другой вариант решения задачи, при котором на первом этапе исходная смесь делится на две промежуточные фракции таким образом, чтобы в каждой из них, кроме зерна основной культуры, были частицы только одной из двух примесей. Тогда вторым этапом будет сепарирование этих промежуточных фракций по способам, соответствующим основному признаку различия компонентов. В этом варианте сумма производительностей сепарирующих машин второго этапа равна производительности машины первого этапа.

Можно рассмотреть и другие варианты в зависимости от свойств компонентов и концентрации примесей в исходной смеси, возможностей размещения оборудования и транспортных средств, а также других факторов, отражающих специфику предприятия и условий его работы.

Следует отметить, что для выбора оптимальных вариантов технологической схемы очистки зерна и способов сепарирования на каждом этапе особое значение приобретают вторичные (сопутствующие) признаки различия компонентов смеси, использование которых на первом этапе может существенно уменьшить производительность и повысить эффективность работы машин последующих этапов, причем на втором этапе эти признаки могут оказаться первостепенными.

Основной, но не единственный источник информации при выборе главных и сопутствующих признаков различия компонентов смеси — это корреляционные таблицы или полигоны распределения свойств. Другими источниками должны быть результаты исследований различных способов сепарирования, которые в разных областях параметров могут усиливать влияние одинаково направленных признаков или уменьшать влияние вторичных признаков, направленных противоположно основному.

§ 1. Показатель направленности процесса фракционирования

В процессе фракционирования особенно важно правильно оценить двойственную природу процесса сепарирования зерновых смесей. Она заключается в сочетании блуждания частиц, обусловленного действием случайных факторов при ослаблении сил взаимодействия от вибраций или воздушного потока и направленного движения в результате проявления различия в свойствах.

Мера влияния каждой из этих сторон процесса зависит от степени различия свойств компонентов смеси и параметров процесса.

Эффект сепарирования тем выше, чем больше проявляется его детерминированная природа и меньше — стохастическая.

Например, рассмотрим смесь двух компонентов A и B , масса которых составляет соответственно Q_A и Q_B , а концентрация $K_A = \frac{Q_A}{Q_A + Q_B}$ и $K_B = \frac{Q_B}{Q_A + Q_B}$. При их разделении получают две фракции a и b , характеризующиеся соответственно количествами q_a и q_b и составом

$$q_a = q_{Aa} + q_{Ba} \text{ и } q_b = q_{Ab} + q_{Bb},$$

где первая буква индекса указывает компонент, вторая — фракцию.

Коэффициенты извлечения каждого компонента в предназначенную для него фракцию и его концентрация в ней следующие:

$$\eta_{Aa} = \frac{q_{Aa}}{Q_A}, K_{Aa} = \frac{q_{Aa}}{q_a} \text{ и } \eta_{Bb} = \frac{q_{Bb}}{Q_B}, K_{Bb} = \frac{q_{Bb}}{q_b}.$$

Выход каждой фракции характеризуют отношения

$$P_a = \frac{q_a}{Q_0} \text{ и } P_b = \frac{q_b}{Q_0},$$

где $Q_0 = Q_A + Q_B = q_a + q_b$ — количество исходной смеси.

Если бы все частицы смеси имели одинаковые физико-механические свойства, но несли на себе метку одного из компонентов, то при множестве повторностей эксперимента среднее количество каждого компонента в каждой фракции было бы пропорционально ее выходу, иначе говоря, состав обеих фракций совпадал бы с составом исходной смеси. В этом случае попадание каждой частицы в какую-либо фракцию — явление случайное, обусловленное только стохастической природой процесса, а эффект сепарирования равен нулю.

Если признаки различия частиц и условия эксперимента обеспечивают попадание частиц каждого компонента только в предназначенную для него фракцию, то стохастичность процесса не проявляется; его природа полностью детерминирована, а эффект сепарирования максимален.

В реальных процессах рассмотренные предельные случаи не наблюдаются, а для оценки направленности процесса извлечения компонента в предназначенную для него фракцию служит показатель, пропорциональный выходу этой фракции к относительному увеличению концентрации данного компонента в ней сравнительно с его концентрацией в исходной смеси:

$$\left. \begin{aligned} \delta_{Aa} &= P_a \frac{K_{Aa} - K_A}{K_A}; \\ \delta_{Bb} &= P_b \frac{K_{Bb} - K_B}{K_B} \end{aligned} \right\} \quad (470)$$

Равенства (470) после подстановок значений концентраций приводятся к виду

$$\left. \begin{aligned} \delta_{Aa} &= \eta_{Aa} - P_a; \\ \delta_{Bb} &= \eta_{Bb} - P_b \end{aligned} \right\} \quad (471)$$

Если по технологическим или экономическим соображениям показатели направленности фракционирования обоих компонентов равнозначны, то оценку общей направленности процесса можно дать по показателю

$$\delta_0 = \delta_{Aa} + \delta_{Bb} = \eta_{Aa} + \eta_{Bb} - 1. \quad (472)$$

Если цель фракционирования — сосредоточить максимальное количество компонента *A* в минимальном количестве фракции *a*, то достаточно воспользоваться первым уравнением системы (471), чтобы оптимизировать процесс по какому-либо отдельному параметру или по комбинации параметров.

Пусть, например, такой параметр — размер отверстия сита, через которое проходом необходимо извлечь максимальное количество мелкого компонента *A* так, чтобы во фракции *a* содержалось минимальное количество частиц компонента *B*, т. е. чтобы показатель δ_{Aa} был наибольшим. Для этого проводят серию экспериментов, постепенно увеличивая размер отверстия сита и определяя количество и состав фракции *a* при известном составе исходной смеси.

После вычисления значений η_{Aa} и P_a строят график (рис. 88), где по оси абсцисс откладывают P_a , а по оси ординат — η_{Aa} . Разность между ординатами кривой $\eta_{Aa}(P_a)$ и прямой P_a равна значению δ_{Aa} ; $(\delta_{Aa})_{\max}$ соответствует точке, где касательная к кривой $\eta_{Aa}(P_a)$ параллельна прямой P_a . Оптимальный размер отверстия в данном примере такой, при котором получено значение $P_a = 0,42$.

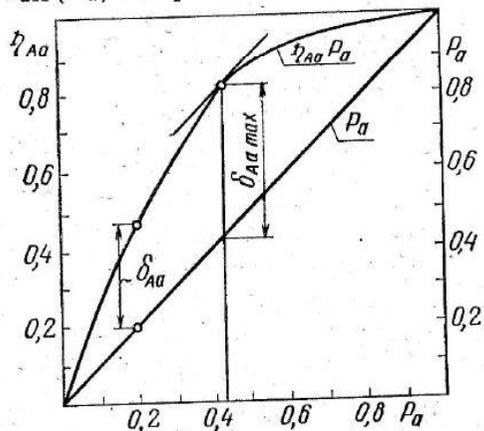


Рис. 88. Кривая для определения показателя направленности процесса фракционирования.

Метод оценки эффективности фракционирования зерновых смесей по показателю направленности процесса можно распространить и на более сложные случаи: а) деление двухкомпонентной смеси на три фракции, из которых в двух должно содержаться максимальное количество каждого компонента, а третья возвращается в исходную смесь (сепарирование с рециркуляцией); б) деление трехкомпонентной

смеси на две, три и более фракций. Понятие «компонент» можно рассматривать условно, объединяя в нем две различные примеси, которые на данном этапе фракционирования целесообразно направить в одну фракцию, подлежащую разделению на первичные компоненты на следующем этапе.

§ 2. Процесс фракционирования на камнеотделительной машине А1-БОК

В качестве примера развитой технологической схемы фракционирования многокомпонентной смеси рассмотрим камнеотделительную машину А1-БОК, схема рабочего органа которой показана на рисунке 89.

Рабочий орган — это горизонтальный ситовой канал, совершающий в горизонтальной плоскости круговые колебания с амплитудой R и частотой ω . Исходная смесь зерна пшеницы *И* поступает на горизонтальное металлочанное сито *1* через отверстие в передней поперечной стенке и образует над ним слой высотой 35—40 мм. Под действием круговых поступательных колебаний смесь самосортируется, в результате чего частицы минеральной примеси и мелкие частицы погружаются, а легкие и менее плотные, чем зерно, частицы (в частности, овсюг) всплывают. Благодаря подпору

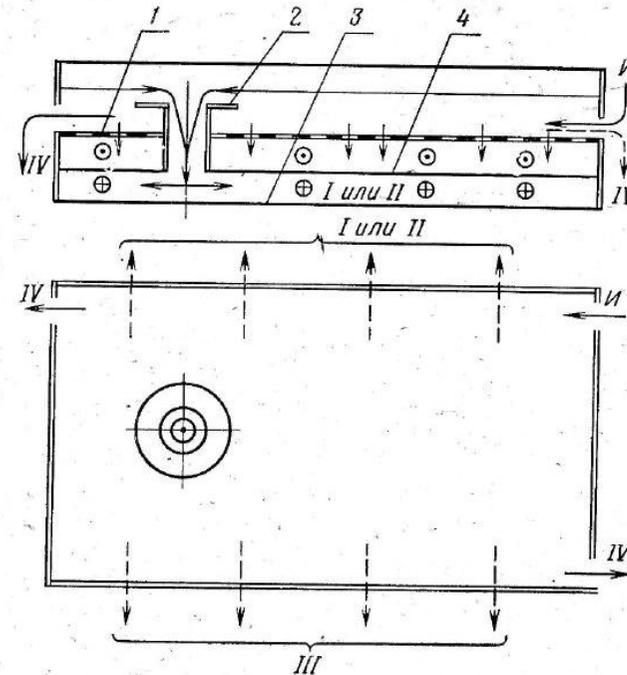


Рис. 89. Схема рабочего органа фракционирующей машины А1-БОК: 1 — сито; 2 — сливной патрубкок; 3 — нижнее дноще; 4 — верхнее дноще; И — исходная зерновая смесь; I, II — фракции зерна; III — подсев; IV — фракция зерна с минеральными примесями.

от вновь поступающей смеси сыпучее тело перемещается вдоль канала, причем часть смеси из верхнего слоя сливается в патрубок 2, образуя фракцию I или II (в зависимости от места данного рабочего органа в машине), содержащую зерно пшеницы и всплывшую примесь; мелкие частицы, достигнув поверхности сита, просеиваются, образуя фракцию III, плотные частицы (минеральные) вместе с наиболее плотными зернами, перемещаясь по ситам, выходят через отверстия внизу передней и задней поперечных стенок канала и образуют фракцию IV. Для вывода из рабочего органа фракции I или II служит нижнее днище 3, а для вывода фракции III — верхнее днище 4, на котором, кроме того, расположены резиновые шарики для очистки сита. Исходную смесь следует рассматривать как состоящую из четырех основных компонентов: зерна пшеницы, мелкой, тяжелой и легкой (длинной) примеси. В результате сепарирования образуются три фракции, из которых только одна (III) направляется из машины в отходы, а остальные фракции на следующем этапе должны быть вновь подвергнуты сепарированию.

Если машину А1-БОК использовать только для очистки зерна от минеральных примесей, то ее обязательным спутником в технологическом процессе должна быть высокоэффективная машина А1-БКР, предназначенная для извлечения минеральной примеси из фракции IV и возвращения очищенного зерна во фракцию I или II.

Так как производительность машины А1-БОК составляет 20 т/ч, а выход фракции IV не превышает 5—7%, то достаточная производительность машины А1-БКР равна 1,0—1,5 т/ч. Причем эту производительность она обеспечивает при коэффициенте очистки $\eta = 0,990—0,995$ с потерей зерна в отходы до 2% по отношению к массе этих отходов.

В машине А1-БКР применен вибропневматический способ сепарирования, описанный в главе 4.

Технологическая схема камнеотделительной машины А1-БОК — А1-БКР показана на рисунке 90.

Машина А1-БОК состоит из четырех одинаковых секций с 12 рабочими органами (ситовыми рамами) в каждой. Первые шесть ситовых рам приемные и работают параллельно в одинаковых условиях.

Полученные в них фракции I и III не подвергаются дальнейшей обработке в этой машине, а фракция IV поступает в качестве исходной смеси на группу из четырех параллельно работающих ситовых рам, расположенных ниже. В этой группе ситовых рам извлекаются и выводятся из машины фракции II и III, а фракция IV вновь направляется на нижнюю группу из двух контрольных ситовых рам, соединенных последовательно таким образом, что фракция II верхней рамы представляет собой исходную смесь для нижней, а остальные фракции этих рам объединяются. Общий коэффициент извлечения минеральных примесей в машине А1-БОК со-

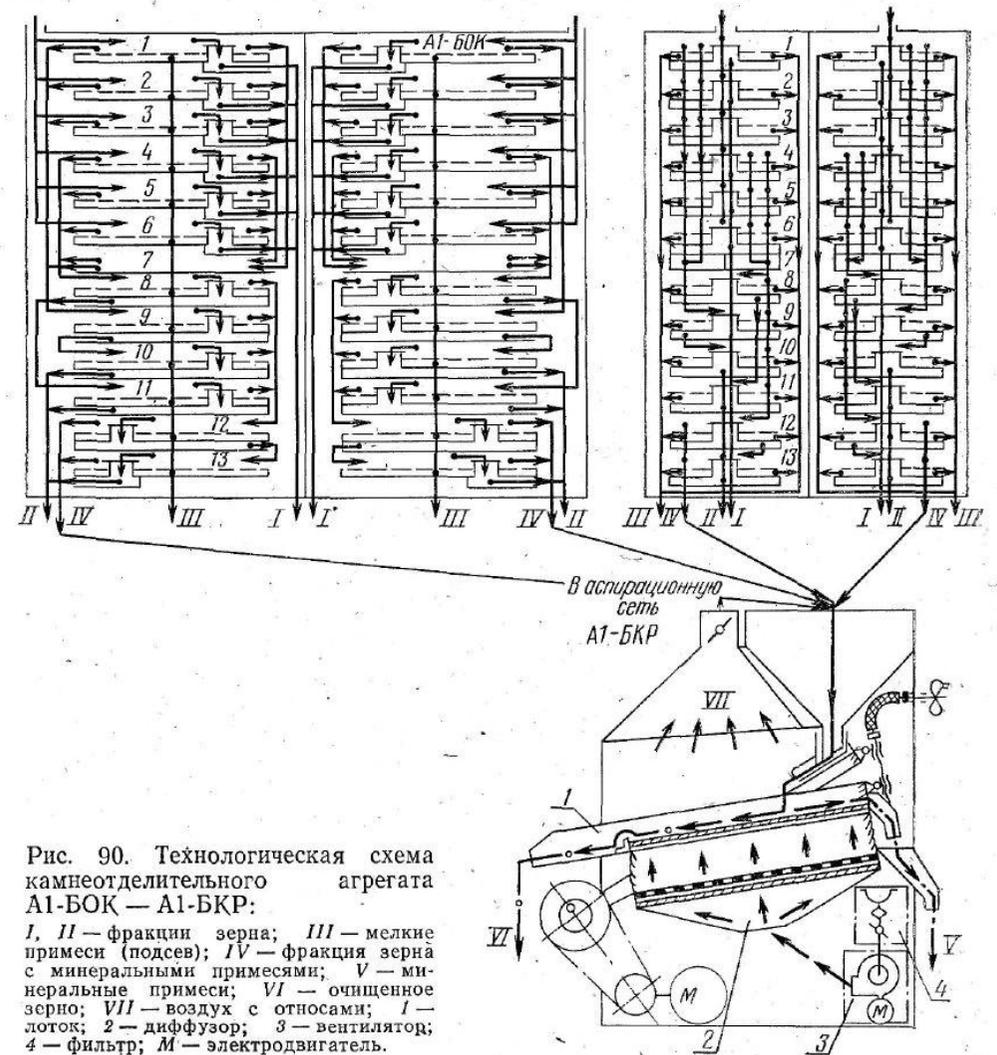


Рис. 90. Технологическая схема камнеотделительного агрегата А1-БОК — А1-БКР:

I, II — фракции зерна; III — мелкие примеси (подсев); IV — фракция зерна с минеральными примесями; V — минеральные примеси; VI — очищенное зерно; VII — воздух с отходами; 1 — лоток; 2 — диффузор; 3 — вентилятор; 4 — фильтр; М — электродвигатель.

ставляет $\eta_m = 0,95—0,96$, а показатель направленности ее извлечения $\delta_{mIV} = 0,88—0,91$.

§ 3. Теоретические предпосылки к созданию технологических линий с поэтапным фракционированием*

Сепарирование с поэтапным фракционированием зерновой смеси позволяет не только повысить эффективность очистки зерна от примесей, но и разделить очищенное зерно на фракции для

* В параграфе с некоторыми изменениями и сокращениями воспроизведено содержание раздела «Опыт разработки технологических схем фракционного сепарирования зерна на мукомольных заводах» из брошюры В. Г. Дулаева и др.

совершенствования последующих операций в процессе переработки, а в некоторых случаях — и в процессе хранения.

Так, на первых стадиях очистки зерна пшеницы бывает целесообразным выделить фракцию мелкого зерна (проход сита с отверстиями размером $2,2 \times 20$ мм — сход с сита с отверстиями размером $1,7 \times 20$ мм) для использования ее при производстве комбикормов. При подготовке зерна к сортовому помолу раздельная гидротермическая обработка (ГТО) двух потоков, в которых зерна отличаются размерами, плотностью и массой 1000 зерен, более эффективна, так как позволяет установить для каждого из них различные оптимальные параметры и режимы. Выделение мелкой фракции может быть полезным и для раздельного размола.

При развитой схеме поэтапного фракционирования количество выделенных фракций зерна может превысить число потоков, подвергаемых в дальнейшем раздельной обработке.

Тогда возникает вопрос о целесообразном группировании этих фракций таким образом, чтобы в каждом потоке физико-механические свойства зерна были достаточно близкими, а зерна различных потоков отличались по этим свойствам наиболее существенно. Это необходимо также для наиболее полного использования последующего технологического и транспортного оборудования соответственно его номинальной производительности. Для оценки эффективности фракционирования зерна по его физико-механическим свойствам при последующей двухпоточной переработке применяют коэффициент различия потоков

$$\psi_{1,2} = |\psi_1 - \psi_2|, \quad \% \quad (473)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \frac{\sum_1^n \psi_i P_i}{\sum_1^n P_i}; \\ \psi_2 &= \frac{\sum_1^n \psi_j P_j}{\sum_1^n P_j} \end{aligned} \right\} \quad (474)$$

где ψ_1 и ψ_2 — коэффициенты отличия зерна соответственно 1-го и 2-го потоков от исходного зерна по средневзвешенному значению выбранного показателя физико-механических свойств; ψ_i, ψ_j и P_i, P_j — аналогичные коэффициенты различия фракций зерна, входящих соответственно в 1-й и 2-й потоки и выхода этих фракций.

Каждый коэффициент различия фракции и исходного зерна равен

$$\psi = 1 - \frac{\bar{x}}{x_0}, \quad (475)$$

где \bar{x} и x_0 — средние значения данного признака соответственно фракции и исходного зерна.

Структура технологических схем поэтапного фракционирования.

Представим технологическую схему сепарирования зерна как совокупность связанных в определенном порядке групп машин (рабочих органов), в свою очередь, состоящих из подгрупп машин (рабочих органов).

Группой назовем совокупность машин (рабочих органов), каждая из которых участвует в одном из трех процессов обработки зерна: очистки, фракционирования, сортирования.

Подгруппой назовем совокупность машин (рабочих органов) одинакового принципа действия, каждая из которых участвует в одном и том же процессе, обрабатывая одну и ту же исходную зерновую смесь.

В зависимости от рассматриваемого процесса будем различать группы машин для очистки зерна от данных видов примесей и группы машин для фракционирования и сортирования.

Учитывая применение совмещения процессов обработки зерна на одном рабочем органе, будем полагать возможным включение фракционирующих машин в группы машин для очистки и сортирования зерна.

Совокупность всех групп машин для очистки зерна образует технологическую схему очистки зерна, группы машин для фракционирования (сортирования) зерна образуют схему фракционирования (сортирования) зерна. Общая схема сепарирования зерна объединяет схемы трех рассматриваемых процессов.

Методику расчета и построения технологических схем сепарирования зерна удобно представить четырехстадийной.

На первой стадии определяют количество и качество готовых фракций и извлекаемых компонентов. В соответствии с этими величинами определяют число групп в схемах процессов.

Для процесса очистки это означает необходимость определения (задания) эффективности извлечения примесей и их классификации. При рассмотрении первой стадии построения процесса фракционирования необходимо определить (задать) количество и качество промежуточных фракций как по составу примесей и эффективности их извлечения, так и по свойствам основного компонента — зерна пшеницы (ржи).

Для процесса сортирования первая стадия заключается в задании количества и качества готовых фракций, причем качество их определяется только свойствами основного компонента.

Вторая стадия построения схем для трех рассматриваемых процессов заключается в выборе машин (рабочих органов), на которых можно выполнить все задачи, определенные на первой стадии.

Например, для построения схемы очистки необходимо выбрать машины (рабочие органы), способные осуществить очистку от всех видов примесей, определенных при их классификации.

Третья стадия построения схемы сепарирования зерна включает расчет и компоновку схем отдельно каждого составляющего процесса (очистки, фракционирования, сортирования). На этой стадии сначала для каждого процесса определяют последовательность расположения машин (рабочих органов), а затем осуществляют расчет группы машин по условиям заданной эффективности и ограничениям выходов фракций.

После определения последовательности расположения и количества машин (рабочих органов) в каждой группе компонуют группы в технологическую схему. На этом этапе рассматривают возможность совмещения отдельных операций на одной машине (рабочем органе). При компоновке схем каждого процесса можно корректировать последовательность расположения и число машин в группах.

Предусмотрено последовательное чередование операций расчет — компоновка до выполнения заданных условий. Завершается третья стадия поверочным расчетом групп по условиям эффективности и ограничения выхода фракций.

На четвертой стадии производят компоновку и расчет технологической схемы сепарирования зерна в целом. Предусматривая возможную корректировку технологических схем отдельных процессов, объединяют их в одну схему. При этом ограничения — количество и качество готовых фракций и извлекаемых компонентов. Рассчитывают количество и качество очищенного зерна и отходов. Завершается четвертая стадия компоновкой готовых фракций в потоки, причем принцип компоновки — это максимальное различие потоков по выбранным в качестве определяющих свойствам основного компонента (зерна).

В дальнейшем для примера рассмотрим построение схемы очистки зерна на мукомольном заводе.

Количество групп в схеме очистки зерна определяется числом классов, в которое можно скомпоновать все виды сорной и зерновой примеси, встречающиеся в зерне и перечисленные в действующих стандартах. Признак отнесения данного вида примесей к тому или иному классу — это основное физико-механическое свойство, по которому данный вид примеси отличается от зерен основной культуры (пшеницы).

Можно перечислить семь классов, в которые группируется большинство примесей: грубые, крупные, мелкие, легкие, тяжелые (плотные), длинные, короткие.

Иногда оказывается удобным отдельно рассматривать эти классы в группе сорной и зерновой примеси.

При классификации использованы в основном размерные характеристики примесей. Более тщательное изучение физико-механических свойств примесей — это основа создания новых рабочих органов, очищающих и фракционирующих зерновую смесь с использованием большого комплекса признаков, отличающих примеси от зерна основной культуры.

Общая расчетная схема и основные аналитические соотношения. Без ограничения общности рассмотрим схему очистки зерна (рис. 91).

Схема включает в себя 1, 2, 3, ..., k , ..., l ярусов. В каждом ярусе имеется 1, 2, 3, ..., jk , ..., m_k подгрупп машин (рабочих органов). В каждой подгруппе имеется 1, 2, 3, ..., i , ..., n_{jk} машин. Из каждой машины выходит 1, 2, 3, ..., z фракций. Одноименные z -е фракции с каждой машины и каждой подгруппы собираются в узлах jk и поступают параллельно на последующие подгруппы.

В схему можно включать «фиктивные» машины (рабочие органы), не обрабатывающие фракции. Эти машины для расчета удобно располагать на линиях сбора готовых фракций, например отходов.

Группы t машин в схеме образуются как совокупности подгрупп различных ярусов. Иначе говоря, если рассмотреть любую ломаную, связывающую между собой узлы jk , то группу образуют все подгруппы, встреченные при рассмотрении. Таким образом, число групп в схеме не меньше числа возможных ломаных, соединяющих узлы между собой.

Из каждой группы выпускаются очищенные фракции: «Зерно 1», «Зерно 2» и т. д. Введем следующие обозначения:

Из каждой группы выпускаются очищенные фракции: «Зерно 1», «Зерно 2» и т. д. Введем следующие обозначения:

$$\frac{q_{ijk}^{nz}}{q_{ijk}} = P_{ijk}^z \text{ — выход } z\text{-й фракции (компонента) с } i\text{-й машины } j\text{-й подгруппы,}$$

расположенной в k -том ярусе; q_{ijk} — количество продукта, поступающего в единицу времени на i -ю машину j -й подгруппы k -го яруса; q_{ijk}^z — количество извлекаемой z -й фракции (компонента), поступающее в единицу времени с исходным продуктом на i -ю машину j -й подгруппы k -го яруса; q_{ijk}^{nz} — количество z -й фракции (компонента), извлекаемое в единицу времени на i -й машине j -й подгруппы

$$k\text{-го яруса; } \frac{q_{ijk}^{nz}}{q_{ijk}} = n_{ijk}^z \text{ — коэффициент извлечения (очистки) } z\text{-го компонента}$$

на i -й машине j -й подгруппы k -го яруса; Q — количество продукта, поступающего в единицу времени на обработку по схеме; Q_{jk} — количество продукта, поступающего в единицу времени на j -ю подгруппу k -го яруса.

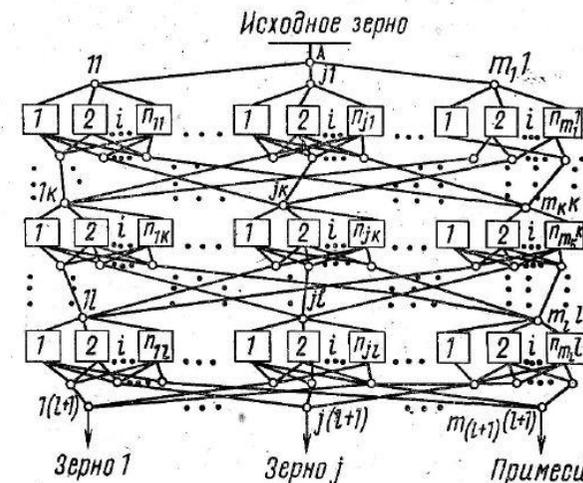


Рис. 91. Общая расчетная схема очистки зерна с поэтапным фракционированием.

Определим некоторые соотношения между введенными величинами:

$$P_{jk}^z = \frac{\sum_i q_{ijk} P_{ijk}^z}{\sum_i q_{ijk}} \text{ — выход извлекаемой } z\text{-й фракции (компонента) с } j\text{-й подгруппы } k\text{-го яруса;}$$

$$\eta_{jk}^z = \frac{\sum_i q_{ijk} \eta_{ijk}^z}{\sum_i q_{ijk}^z} \text{ — коэффициент извлечения } z\text{-го компонента } j\text{-й подгруппы } k\text{-го яруса;}$$

$$\alpha_{j1} = \frac{Q_{j1}}{Q} \text{ — относительное количество продукта, поступающее в единицу времени в узел } j \text{ из точки } A.$$

При принятых обозначениях будем иметь:
выход извлекаемой z -й фракции (компонента) с рассматриваемой t -й группы, начинающейся в узле $j1$

$$P_t^z = \alpha_{j1} [1 - \prod_{(jk)} (1 - P_{jk}^z)];$$

выход обрабатываемой фракции с этой же группы составит

$$P_t^0 = \alpha_{j1} \prod_{(jk)} P_{jk}^0.$$

Для рассматриваемой группы должны выполняться следующие равенства:

$$P_{jk}^z = 1 - P_{jk}^0,$$

$$P_t^z = 1 - P_t^0;$$

суммарный выход извлекаемой z -й фракции (компонента) по всем группам для узла $j(l+1)$ равен

$$P_{j(l+1)}^z = \sum_t \alpha_{j1} [1 - \prod_{(jk)} (1 - P_{jk}^z)];$$

суммарный выход обрабатываемой z -й фракции по всем группам для этого же узла составит

$$P_{j(l+1)}^0 = \sum_t \alpha_{j1} \prod_{(jk)} P_{jk}^0;$$

коэффициент извлечения z -го компонента на рассматриваемой t -й группе, начинающейся в узле $j1$, равен

$$\eta_t^z = \alpha_{j1}^z [1 - \prod_{(jk)} (1 - \eta_{jk}^z)],$$

где α_{j1}^z — относительное количество извлекаемой фракции, поступающей в единицу времени с исходным продуктом в узел $j1$ из точки A .

Суммарный коэффициент извлечения z -го компонента по всем группам для произвольного узла $j(l+1)$ равен

$$\theta_{j(l+1)}^z = \sum_t \alpha_{j1}^z [1 - \prod_{(jk)} (1 - \eta_{jk}^z)].$$

Концентрация извлекаемого z -го компонента в обрабатываемой фракции после очистки смеси на рассматриваемой t -й группе составит

$$k_t^z = \frac{k_{j1t}^z}{(1 - P_t^z)} (1 - \eta_t^z),$$

где k_{j1t}^z — концентрация извлекаемой фракции в исходном продукте, поступающем на обработку на рассматриваемую группу, начинающуюся в узле $(j1)$.

Концентрация извлекаемого компонента (примесей) после обработки на всех группах, формирующих фракцию готового зерна в произвольном узле $j(l+1)$ последнего яруса, составит

$$K_{j(l+1)}^z = \frac{K_A^z}{[1 - P_{j(l+1)}^z]} [1 - \theta_{j(l+1)}^z], \quad (476)$$

где $K_A^z = \frac{\sum_t k_{j1t}^z Q_{j1}}{Q}$ — концентрация рассматриваемой извлекаемой фракции (примеси) в исходном зерне.

Минимальное количество подгрупп в группе по условиям достижения заданной эффективности $\eta_{зад}$ извлечения компонентов определяется по формуле

$$T_{min} = \frac{\lg(\alpha_{j1} - \eta_{зад}) - \lg \alpha_{j1}}{\lg(1 - P_{jk})}. \quad (477)$$

Формула получена из условия одинаковой эффективности η_{jk} всех подгрупп, равной наименьшей из них.

Максимальное количество подгрупп машин в группе по условиям ограничения выхода извлекаемой фракции определяют по формуле

$$T_{\max} = \frac{\lg(\alpha_{j1} - P_{\text{зад}}) - \lg \alpha_{j1}}{\lg(1 - P_{jh}^z)} \quad (478)$$

В качестве примера на рисунке 92 показана технологическая схема линии очистки зерна пшеницы с двухэтапным фракционированием, выполняемым последовательно в шкафных сепараторах А1-ЗСШ и камнеотделительных машинах А1-БОК, спроектированная в соответствии с изложенными теоретическими предпосылками.

Линия предназначена для мукомольного завода сортового помола и имеет производительность 20 т/ч.

Исходная смесь поступает в два воздушных сепаратора БВЗ, на которых смонтированы вращающиеся цилиндрические сита (скальператоры) для предварительной очистки от грубых примесей, подача которых в шкафные машины недопустима. В вертикальных каналах воздушных сепараторов потоком воздуха извлекаются легкие примеси, которые после осаждения в камерах направляют в отходы, а очищенное зерно — равными потоками в четыре секции сепаратора ЗСШ-20. На четырех параллельно работающих приемных ситах сепаратора (1-я группа) при помощи сит с отверстиями $\varnothing 4,5$ мм зерновая смесь делится на две фракции: сход (в количестве 75%), состоящий из более крупных зерен, уносит крупные примеси, а проход (в количестве 25%) содержит мелкие примеси и до 20% длинных (овсюг).

Сходовая фракция поступает на три нижние рамы, через сита которых с отверстиями $\varnothing 8$ мм извлекается проходом очищенное зерно, а сходом — крупные примеси, направляемые в отходы. Проход каждого приемного сита направляется на расположенную под ним раму с металлотканым ситом № 2,8. Сход с сит этих рам, образующих 2-ю группу, очищенный от значительной доли мелких примесей, выводится из сепаратора в качестве мелкой фракции зерна, а проход с большей частью мелких примесей становится исходной смесью для трех последовательно соединенных рам с ситом с отверстиями размером $1,7 \times 20$ мм. На этих ситах 3-й группы проходом извлекаются мелкие примеси, выводимые из машины в отходы, а сход соединяется со сходом четырех рам 2-й группы, лежащих выше.

Таким образом, после сепаратора ЗСШ-20 получают две фракции предварительно очищенного зерна: крупную, содержащую большую часть длинных примесей, и мелкую, содержащую большую часть мелких и коротких примесей.

Соответственно мощности этих потоков первый поступает в три секции машины А1-БОК, а второй — в одну секцию. Здесь на всех 12 ситах № 2,0 в каждой секции проходом извлекаются оставшиеся мелкие примеси, выводимые в отходы. На первых шести рабочих органах каждой секции во фракцию I (см. рис. 89) вместе

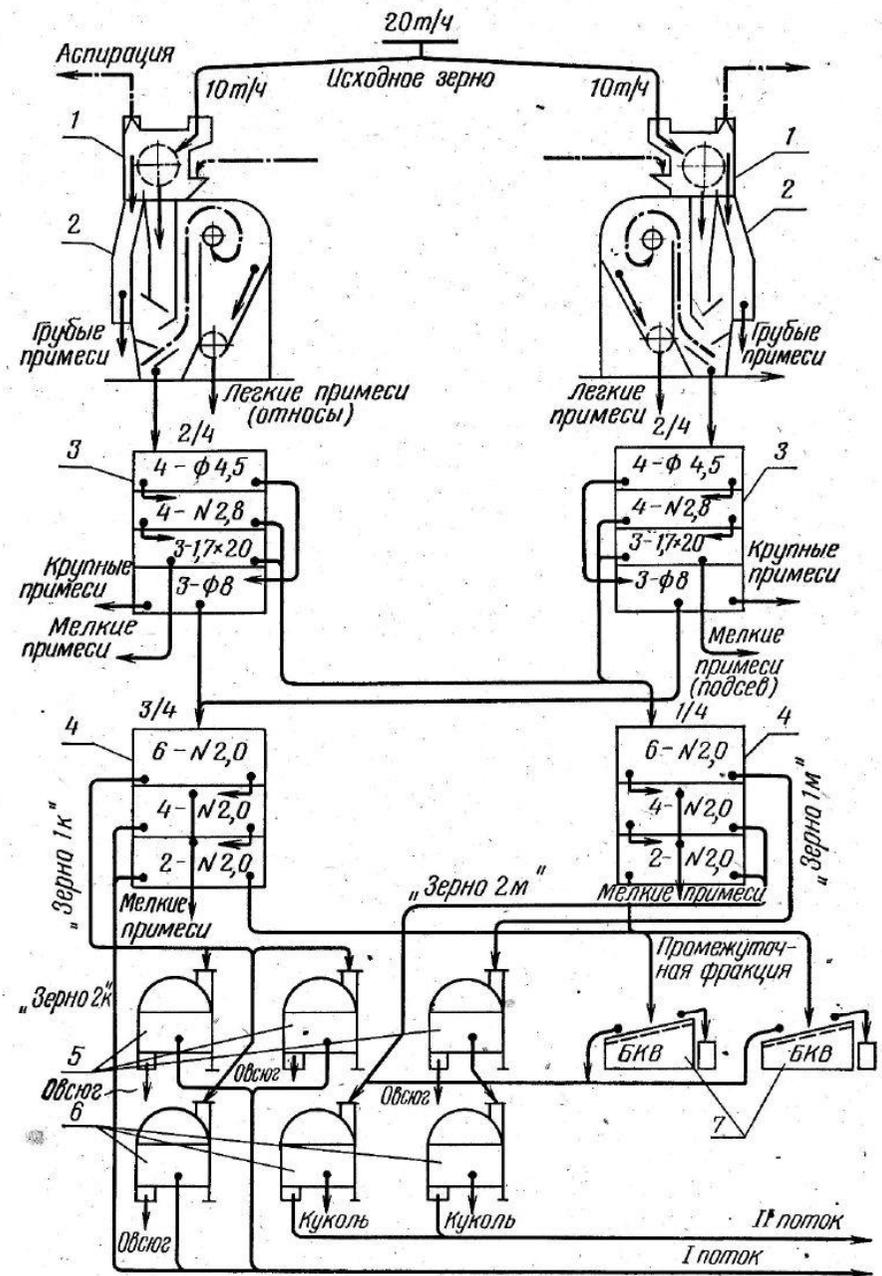


Рис. 92. Технологическая схема линии очистки и фракционирования зерна производительностью 20 т/ч на основе шкафных сепараторов ЗСШ-20 и машин А1-БОК:

1 — скальператор; 2 — пневмоасpirатор БВЗ; 3 — шкафной сепаратор ЗСШ-20; 4 — камнеотделительная машина А1-БОК; 5 — триер-овсягоотборочная машина ЗТО-5; 6 — триер-куколетотборочная машина ЗТК-5; 7 — вибропневматическая камнеотделительная машина А1-БКВ.

с зерном извлекается 90—98% длинных примесей, причем количество этой фракции составляет около 75%. На остальных восьми рабочих органах выделяют фракцию II, которая из трех секций непосредственно выводится в первый поток очищенного зерна, а из четвертой — предварительно очищается от коротких примесей в куколеотборочной машине ЗТК-5 и поступает в тот же поток. Фракцию I из трех секций направляют на три овсюгоотборочные машины ЗТО-5, а из четвертой — на одну машину, после которой эта фракция очищается от коротких примесей в куколеотборочной машине ЗТК-5. Зерно, очищенное в трех триерах ЗТК-5, объединяется во втором потоке. Фракции IV объединяются из всех четырех секций и направляются в вибропневматическую машину А1-БКР, где верхним сходом получают минеральную примесь, а нижним — зерно, направляемое после триера ЗТК-5 во второй поток.

Описанная схема с поэтапным фракционированием перед обычно применяемой схемой, которую можно назвать прямоточной с неоднократным пропуском зерновой смеси через одни и те же машины, обладает следующими преимуществами. Во-первых, до 25% зерна очищается от длинных и коротких примесей без применения триеров. Во-вторых, степень очистки зерна от сорной и зерновой примесей существенно возрастает. В-третьих, получают два потока зерна с различными физико-механическими свойствами.

Результаты сравнительной оценки этих схем показали, что в схеме с поэтапным фракционированием повышается коэффициент извлечения сорных примесей на 8—10%, а зерновых — в несколько раз, что позволяет почти вдвое снизить засоренность зерна, поступающего в размол. Установлено, что зерно пшеницы в первом и во втором потоках существенно различается массой 1000 зерен и объемом зерновок. По первому признаку коэффициент различия достигает 32%, что создает предпосылки для оптимизации процесса ГТО зерна, чтобы увеличить выхода высоких сортов муки.

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА СЕПАРИРУЮЩИХ МАШИН

Глава 11. СИТОВЫЕ СЕПАРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

В зависимости от характера движения рабочего органа ситовые устройства можно подразделить на три группы: с круговыми колебаниями в горизонтальной плоскости, с прямолинейными колебаниями и с круговыми колебаниями в вертикальной плоскости.

Наиболее распространены в зерноочистительных машинах ситовые устройства, совершающие прямолинейные колебания и круговые колебания в горизонтальной плоскости. Ситовые устройства с круговыми колебаниями в вертикальной плоскости пока широко не применяют.

Сита в зерноочистительных машинах обычно располагают наклонно и сообщают им прямолинейные колебания в горизонтальном направлении. В ряде машин, например в ситовечных машинах ЗМС, зерноситовечной машине БЗГ, наклонному сити сообщают прямолинейные колебания, направленные под углом к горизонтали. В зерноочистительных сепараторах БМС-6, БИС-12 и БИС-100 наклонным ситам сообщают круговое поступательное движение. Отличительная особенность шкафных сепараторов ЗСШ-20 и БМС-12 заключается в том, что ситовая установка с горизонтально расположенными ситами совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости.

Прямолинейные колебания ситовым устройствам сообщают кривошипно-шатунным (эксцентриковым) приводным механизмом, эксцентриковым и инерционным (направленного действия) колебателями. Колебания, направленные под углом к вертикали, возбуждаются инерционным (направленного действия) колебателем.

Круговые колебания в горизонтальной либо в вертикальной плоскости обеспечиваются благодаря инерционному дебалансному колебателю.

В зависимости от назначения различают ситовые устройства для очистки зерна от примесей, сортирования и фракционирования зерновой смеси, отделения шелушенных зерен от нешелушенных, сортирования промежуточных продуктов измельчения зерна, сепарирования компонентов комбикормов. В сельскохозяйственных зерноочистительных машинах очистку и сортирование зерна чаще всего совмещают в одном ситовом устройстве.

§ 1. Устройства с прямолинейными колебаниями сит

Схемы ситовых устройств. Ситовые устройства с прямолинейными колебаниями применяют в зерноочистительных сепараторах, ворохоочистителях, ситовечных и зерноситовечных машинах, крупосортировочных машинах и т. д.

Число и расположение сит в устройствах зависит от назначения зерноочистительных машин. Эти признаки и положены в основу схемных решений ситовых корпусов сепараторов.

Различают в основном пять схем ситовых корпусов (рис. 93).

По схеме *V* выполняют ситовые устройства серийно выпускаемых зерноочистительных сепараторов ЗСМ-50, ЗСМ-100, по схеме *II* — сепараторов ЗСМ-5, ЗСМ-10, ЗСП-5 и ЗСП-10. В сепараторах небольшой производительности ЗСМ-2,5 применяют схему *IV*, а в сепараторах ЗСП-2,5 — схему *I*. Увеличить площадь подсевных сит можно путем применения ситового устройства, выполненного по схеме *III* (в сепараторе ЗСМ-20).

Размеры отверстий сит, применяемых в зерноочистительных сепараторах, приведены в таблице 23.

В зерноочистительных машинах, применяемых в сельском хозяйстве, схемы расположения сит отличаются большим разнообразием (рис. 94). По схемам *I—V* выполняют ситовые устройства машин для предварительной очистки, *VI—X* — для вторичной очистки, *XI* — для калибрования семян. Схемы *I* и *II*, включающие сито для

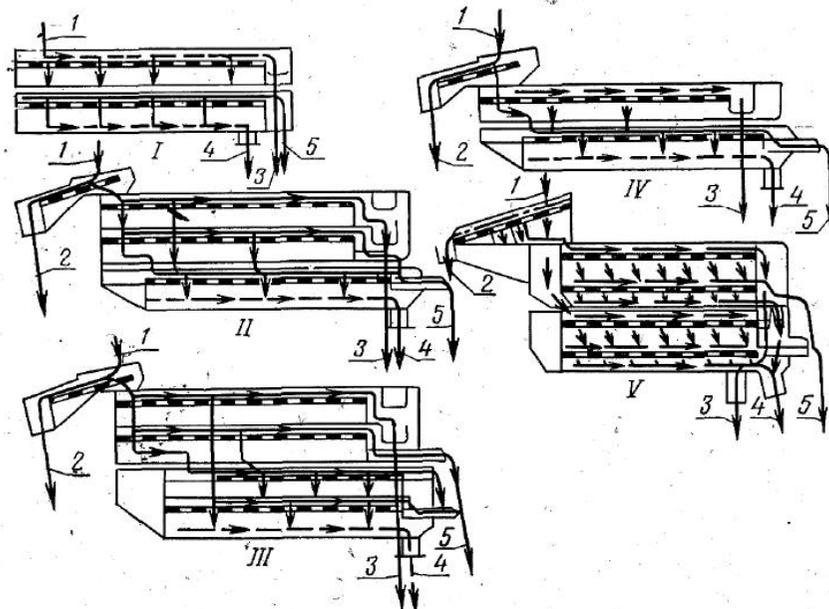


Рис. 93. Схемы ситовых корпусов зерноочистительных сепараторов: 1 — зерновая смесь; 2, 3 — крупные примеси; 4 — мелкие примеси; 5 — зерно.

Таблица 23. Размеры отверстий сит зерноочистительных сепараторов, мм

Очищаемая культура	Диаметр отверстий сита			Размеры подсевного сита
	приемного	сортировочного	разгрузочного	
Пшеница	18	8—7—6,5	5—6	1,7×20
Рожь	18	8—6,5—6	5—6	1,5×20
Ячмень	18	10—9—8	6—7	1,7×20
Овес	18	11—10—9	6—7	1,7×20
Кукуруза	18	12—10—8	6—7	∅ 3,0×3,5
Подсолнечник	18	12—8—6	6—7	∅ 3,0
Просо	18	6,5—5—4	4—5	1,5×20
Гречиха	18	8—7—6	5—7	2,2×20
Горох	20	10—12	6—7	∅ 45

отделения крупных примесей и подсевное сито, применяют в машинах для первичной очистки зерна. Различаются эти схемы только расположением верхнего сита. Схема *III* дважды повторяет схему *I*. Зерновая смесь здесь очищается двумя параллельными потоками. В схемах *IV*, *V* наряду с ситами *I* для отделения крупных примесей и подсевного сита *2* предусмотрено разгрузочное сито *3*, на котором зерновой материал предварительно разделяется по размерам. В схеме *IV* сход с разгрузочного сита (фракция с крупным зерном) направляется на сито для отделения крупных примесей, а проход (фракция с мелким зерном) — на подсевное сито для выделения мелких примесей. В отличие от схемы *IV* в схеме *V* на разгрузочное сито поступает зерновая смесь, очищенная от крупных примесей. Схема *X* отличается от схемы *IV* тем, что в нее дополнительно включено сортировочное сито *4* в виде продолжения подсевного сита. В этой схеме зерновая смесь, очищенная от крупных и мелких примесей, сортируется на две фракции по размерам зерен.

В машинах для вторичной очистки и сортирования семян дополнительно устанавливают сортировочное сито как продолжение подсевного (схема *VI*). На нем выделяется мелкая фракция зерна. Сортировочное сито можно установить над подсевным (схема *VII*). В этом случае нагрузка на подсевное сито уменьшается, поэтому уменьшается требуемая площадь сита. Однако трехъярусное расположение сит усложняет конструкцию устройств для очистки сит и занимает много места по высоте.

Схему *VIII* применяют для очистки семенного материала с большим содержанием крупных примесей. Отличительная особенность этой схемы — два сита для выделения крупных примесей: одно — с продолговатыми отверстиями, другое — с круглыми. Машины для калибрования семян работают по схеме *IX*, включающей четыре сита, расположенных в два ряда. При необходимости увеличения числа фракций добавляют еще ряд сит. Первые сита каждого ряда (K_1 и K_3) с круглыми отверстиями, вторые (K_2 и K_4) — с продол-

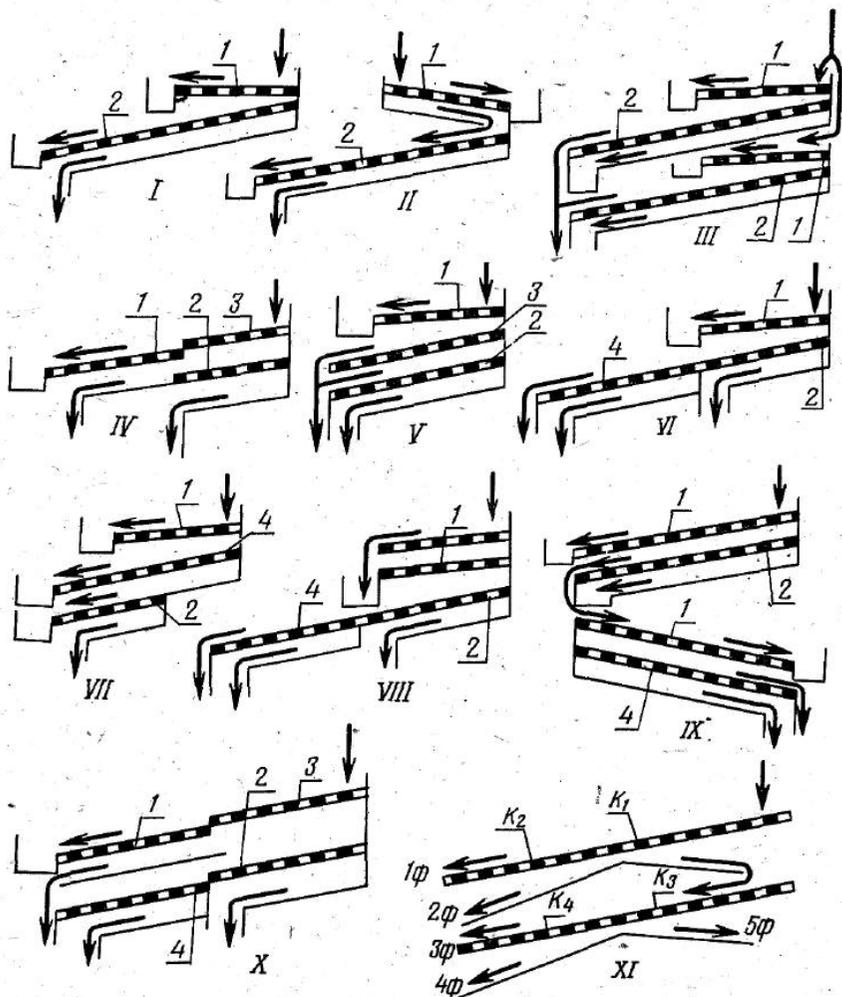


Рис. 94. Схемы расположения сит зерноочистительных машин, применяемых в сельском хозяйстве:

1 — сито для выделения крупных примесей; 2 — подсевное сито; 3 — разгрузочное сито; 4 — сортировочное сито.

говатыми. Рекомендуемые сита для очистки и сортирования семян на сельскохозяйственных зерноочистительных машинах приведены выше (см. табл. 23).

При проектировании ситовых корпусов зерноочистительных сепараторов для зерноперерабатывающих предприятий в начале схемы располагают приемное сито, а затем — сортировочное и подсевное.

Разгрузочное сито размещают между сортировочным и подсевным. В сельскохозяйственных машинах после приемного сита располагают подсевное, а затем сортировочное. Производительность сит должна быть увязана с производительностью машины.

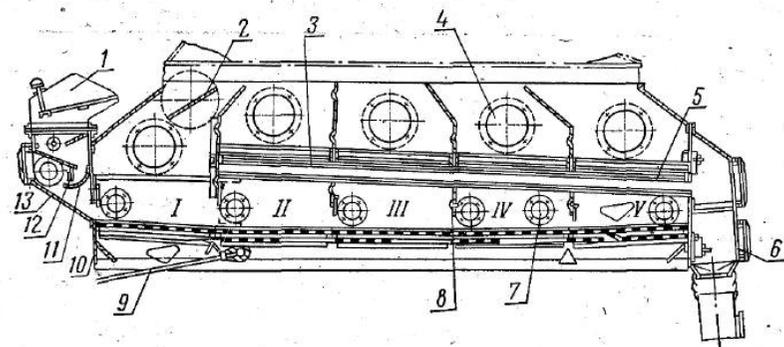


Рис. 95. Ситовое устройство зерноситовеечной машины А1-БЗГ:

1 — питающее устройство; 2 — дроссельный клапан; 3, 5 — кассеты; 4, 7 — смотровые окна; 6 — камера сходов; 8 — перегородка; 9 — кривошипно-патунный механизм; 10 — ситовой кузов; 11 — криволинейный лоток; 12 — заслонка; 13 — распределительная камера.

Угол наклона сит зерноочистительных сепараторов выбирают в следующих пределах; приемных 3—8°, сортировочных 8—14°, подсевных 10—17°. Сито в ворохоочистителях располагают под углом 6—8°.

Располагать сита с наклоном более 8° нецелесообразно, так как увеличивается высота машины.

Однако надо учитывать, что уменьшение угла наклона сит вызывает необходимость увеличивать кинематические параметры, что нежелательно.

В зерноочистительных машинах, применяемых в сельском хозяйстве и на зерноперерабатывающих предприятиях, как правило, ситовые корпуса закреплены на вертикальных подвесках. Наклонное расположение подвесок ухудшает динамическую схему машин и усложняет конструкцию колеблющихся систем, особенно при больших углах наклона. Для очистки зерна нормальной влажности и засоренности углы наклона подвесок ситовых корпусов обычно составляют до 10—12° при наклоне сита около 4°. В некоторых случаях наклон подвесок составляет до 15°.

Конструкция ситовых устройств. Ситовые корпуса серийно выпускаемых зерноочистительных и просеивающих машин изготавливают из фанерованного щита толщиной 20 и 30 мм. Действие низких температур, попадание влаги при транспортировании машины вызывает расслаивание щита и уменьшение срока службы машины, поэтому в последние годы наметился переход к выпуску сепарирующих машин в цельнометаллическом исполнении.

В качестве примера может служить ситовое устройство зерноситовеечной машины А1-БЗГ (рис. 95). Ситовой корпус машины формируют две стальные боковые стенки с направляющими пазами из уголков для установки ситовых рамок.

В передней части ситового корпуса к торцевой стенке прикреплена болтами распределительная камера 13 с двумя плоскими и

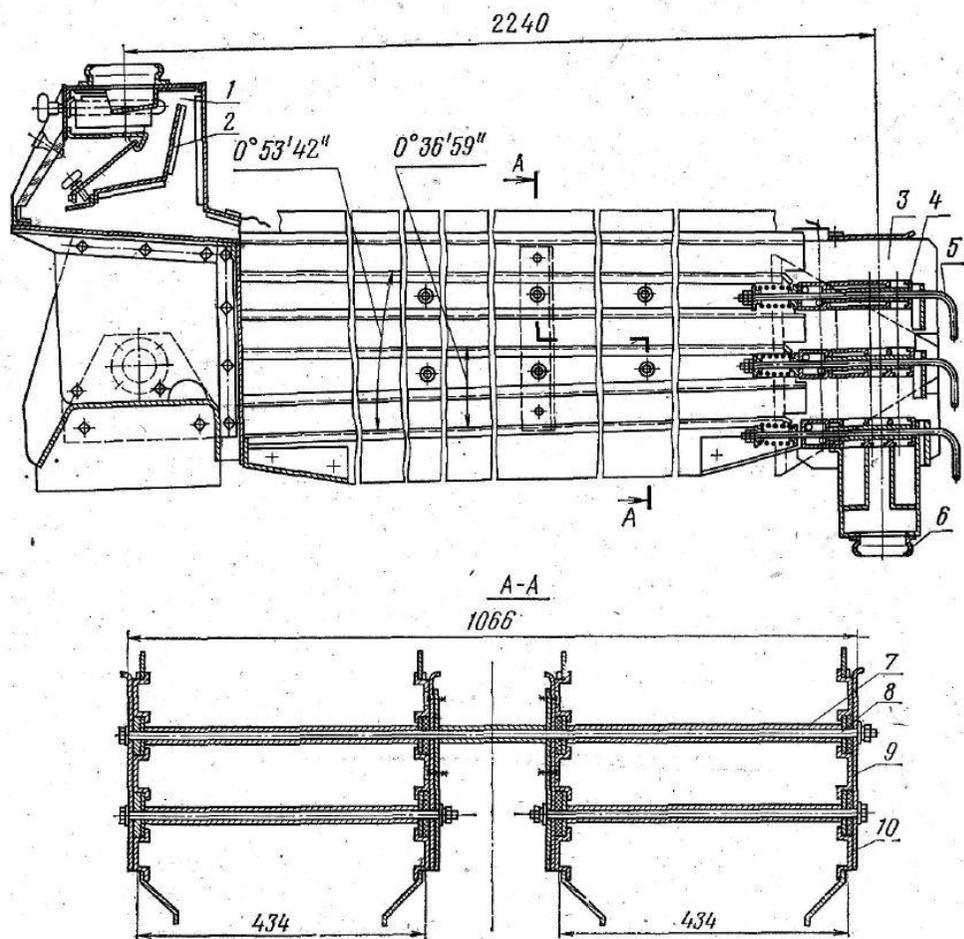


Рис. 96. Ситовой корпус ситовеечной машины марки А1-БСО:

1 — приемная коробка; 2 — распределительный лоток; 3 — камера сходов; 4 — рамка; 5 — рукоятка; 6 — патрубок; 7 — распорная трубка; 8 — стяжка; 9 — боковая стенка; 10 — направляющая.

одним криволинейным 11 лотками. В конце ситового корпуса расположена камера сходов 6.

В боковые стенки ситового корпуса герметично встроено два ряда смотровых окон: верхние 4 — для профилактических ремонтов и осмотров внутренней части корпуса, нижние 7 — для наблюдения за состоянием зерновой смеси. Наряду с ними предусмотрены прозрачные окна в питающей и распределительных коробках.

Над стыками сит с зазором в 50—100 мм установлены поперечные перегородки 8 с нижними выдвижными заслонками для установки минимального зазора между нижним краем перегородки и зерном на сите.

В средних частях перегородок над стыками рам есть проемы, через которые последовательно вставлены две кассеты 3 и 5 с

желобками, имеющими уклон вдоль ситового корпуса к его концу.

Желобки служат для осаждения в них наиболее тяжелых относов при прохождении воздушного потока через сито и слой зерновой смеси.

Камера сходов имеет два отделения, изолированные друг от друга. Верхнее отделение служит для вывода сходов с желобков, нижнее — для вывода сходового продукта с сит.

Применение стального листа, тонкостенных профилей позволило создать конструкцию ситового корпуса необходимой прочности и жесткости при относительно малой массе.

В конструкции ситового корпуса (рис. 96) ситовеечной машины марки А1-БСО применены лист и профили из алюминиевых сплавов.

К боковым стенкам 9 корпуса приклепываются направляющие 10 для ситовых рамок. Для обеспечения заданной ширины корпуса и повышения его жесткости в средней части по его длине стенки соединены стяжками 8 с распорными трубками 7.

В передней части ситового корпуса к боковым стенкам крепится кронштейн для установки эксцентрикового колебателя и приемная коробка 1 с распределительным лотком 2. В конце корпуса находится камера сходов 3 с рамками 4, имеющими подпружиненные рукоятки 5 для фиксации рамок. Продукты из камеры сходов выводятся через патрубки 6.

Жесткость конструкции ситовых корпусов обеспечивается продольными и передними стенками, стяжками, кронштейнами и камерой сходов. Применение профилей и листа из алюминиевых сплавов позволило уменьшить колеблющуюся массу, что особенно важно при динамических знакопеременных нагрузках.

При проектировании ситовых устройств новых образцов сепарирующих машин необходимо стремиться к уменьшению массы колеблющегося корпуса путем применения тонкостенных профилей из стали и проката из дюралюминия.

§ 2. Устройства с круговыми колебаниями сит в горизонтальной плоскости

Схемы ситовых устройств. Ситовые устройства с круговыми колебаниями в горизонтальной плоскости применяют в зерноочистительных сепараторах, отсевах для мукомольных и крупяных заводов, сепарирующих машинах комбикормовых заводов и т. д. Сита могут быть расположены горизонтально и наклонно. Наклонное расположение сит в основном используется на сепараторах для очистки зерна от крупных и мелких примесей. Для фракционирования и сортирования зерновых смесей, а также продуктов измельчения и шелушения зерна применяют ситовые устройства с горизонтально расположенными ситами в несколько ярусов.

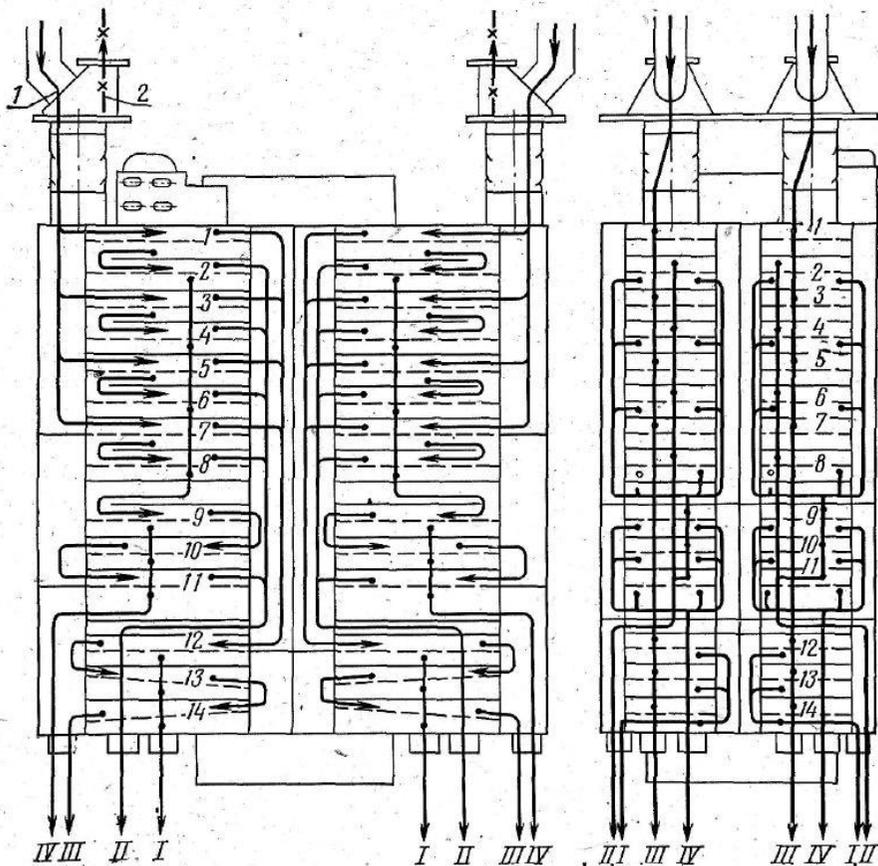


Рис. 97. Схема ситового устройства сепаратора ЗСШ-20:

I — крупное зерно; II — мелкое зерно; III — крупные примеси; IV — мелкие примеси; 1 — зерно; 2 — аспирационные отсосы.

Схемы ситовых устройств сепараторов с наклонными ситами не отличаются от схем I и IV (см. рис. 93) сепараторов с прямолинейными колебаниями ситовых корпусов. Более сложные по технологическому процессу — сепарирующие машины с горизонтально расположенными ситами в несколько ярусов.

На рисунке 97 приведена схема ситового устройства сепаратора ЗСШ-20. В ситовом устройстве сепаратора применена дифференциальная технологическая схема. Зерно разделяется на две фракции (крупное и мелкое), затем очищающиеся от примесей отдельно. Крупное зерно очищается от крупных, мелкое — от мелких примесей. Благодаря такой схеме достигают более эффективной очистки зерна от примесей.

Зерно приемно-распределительным устройством направляется на четыре приемные ситовые рамки 1, 3, 5 и 7 с отверстиями $\varnothing 4,5$ мм. Сход с приемных рамок (крупная фракция с крупными примесями) поступает на сортировочную рамку 12, затем после-

довательно обрабатывается на рамках 12, 13 и 14, на которых установлены сита с отверстиями $\varnothing 8$ мм. С этой группы сит крупные примеси через патрубок в двери выводятся из машины.

Проход сортировочных сит (крупная фракция I) по дну транспортируется к патрубку и выводится из машины.

Проход приемных рамок 1, 3, 5, 7 (мелкая фракция с мелкими примесями) поступает на прямо-подсевные рамки 2, 4, 6, 8, оснащенные металлочеканками ситами с размером ячеек $2,8 \times 2,8$ мм. На этой группе сит выделяется фракция зерна с мелкими примесями, поступающая для дальнейшей обработки на группу подсеивных сит (рамки 9, 10, 11) с отверстиями размером $1,7 \times 16$ мм.

Для интенсификации процесса самосортирования на подсеивных ситовых рамках со стороны выхода зерна имеется бортик высотой 10 мм.

В результате самосортирования в верхних слоях зерновой массы концентрируется зерно, а в нижних — мелкие примеси. Зерно переливается через бортики, не вступая в контакт с ситами, а подсев, находясь в контакте с ситами, просеивается.

Сход с подсеивных рамок (мелкая фракция II), объединяясь со сходом прямо-подсеивных сит 2, 4, 6, 8, через патрубки выводятся из сепаратора.

Проход подсеивных рамок (мелкие примеси IV), собираясь на поддоне-сборнике, выводится через патрубок.

Зерно I (крупной фракции) и II (мелкой фракции), очищенное от примесей, направляется на дальнейшую переработку.

При необходимости объединения крупной фракции с обеих секций ситового корпуса, а также мелкой фракции, крупных примесей и мелких примесей под перекрытием этажом ниже ситового корпуса необходимо установить объединяющие самотечные трубы.

Основные сита, используемые в приемной группе, — это штампованные сита с отверстиями $\varnothing 4,5$ мм. Выбор этих сит обусловлен возможностью работы их без очистки и обеспечением стабильного соотношения сходовой и проходовой фракций, что представляет собой необходимое условие нормальной работы самого сепаратора и последующих машин.

На рисунке 98 приведены схемы сортирования промежуточных продуктов измельчения зерна на рассевах ЗРШ-4М и ЗРШ-6М для сортирования продукта на различных системах размольного процесса.

Конструкции ситовых устройств. Примером конструкции ситовых устройств могут служить ситовые корпуса сепаратора БИС-12, рассевов ЗРМ, ЗРШ-4М и зерноочистительных сепараторов ЗСШ-20.

Ситовой корпус (рис. 99) зерноочистительного сепаратора состоит из двух боковых стенок 8, поперечных передних 1, 3, 4, 6 и поперечных задних 14, 16 стенок, соединенных между собой болтами. К боковым стенкам прикрепляются при помощи точечной сварки направляющие 10 для ситовых рамок 2 и 5. В верхней части корпуса прикрепляется крышка 12 со смотровым люком 9, внизу —

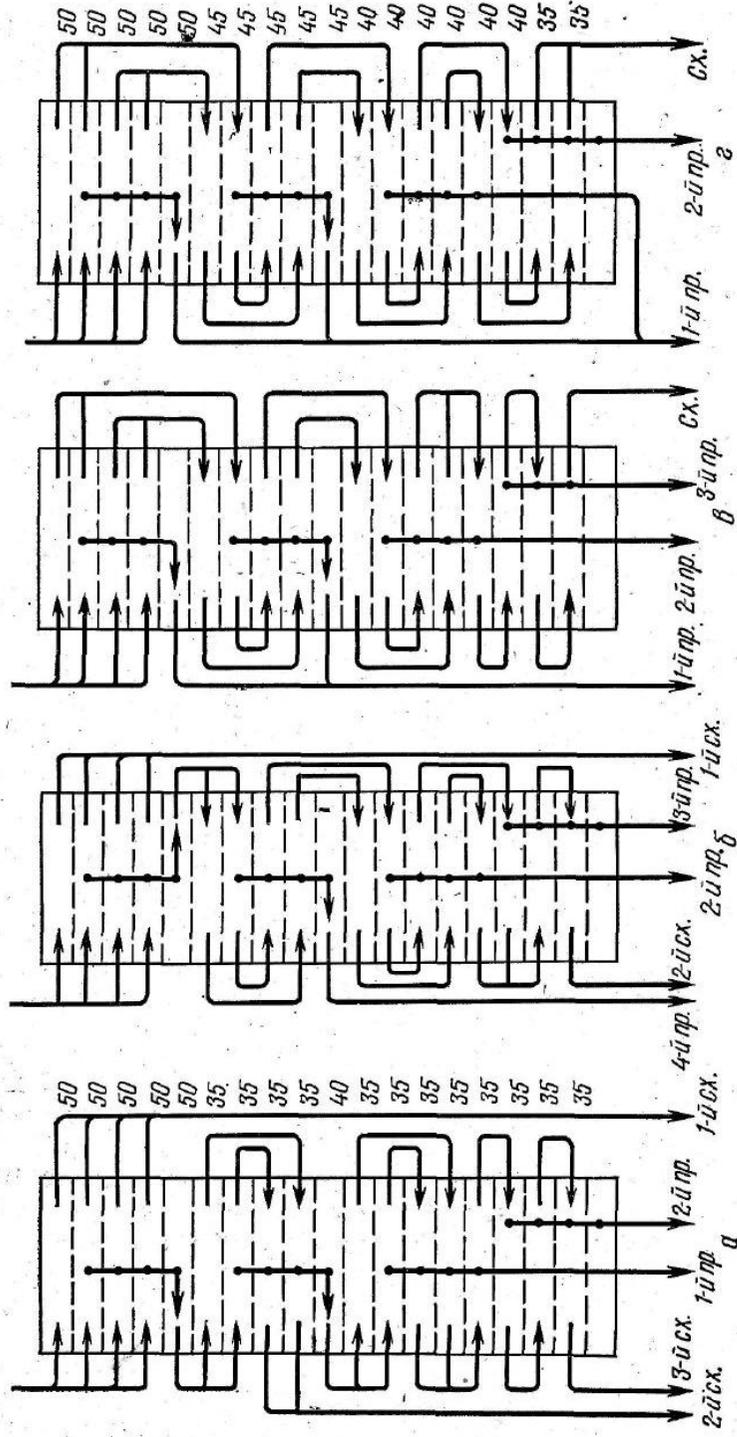


Рис. 98. Схемы сортирования в отсеках ЗРШ-4М и ЗРШ-6М:

а — № 1, для I, II, III и IV дражных систем и 1-й и 2-й шифровочных систем; б — № 2, для V и VI дражных систем, 7—10-й размольных систем, вымольных и сходных систем; в — № 3, для 1—6-й размольных систем, 3-й и 4-й шифровочных систем и для сортировочных систем; г — № 4, для обойного помола (рядом со схемами дана высота надситовых пространств, мм).

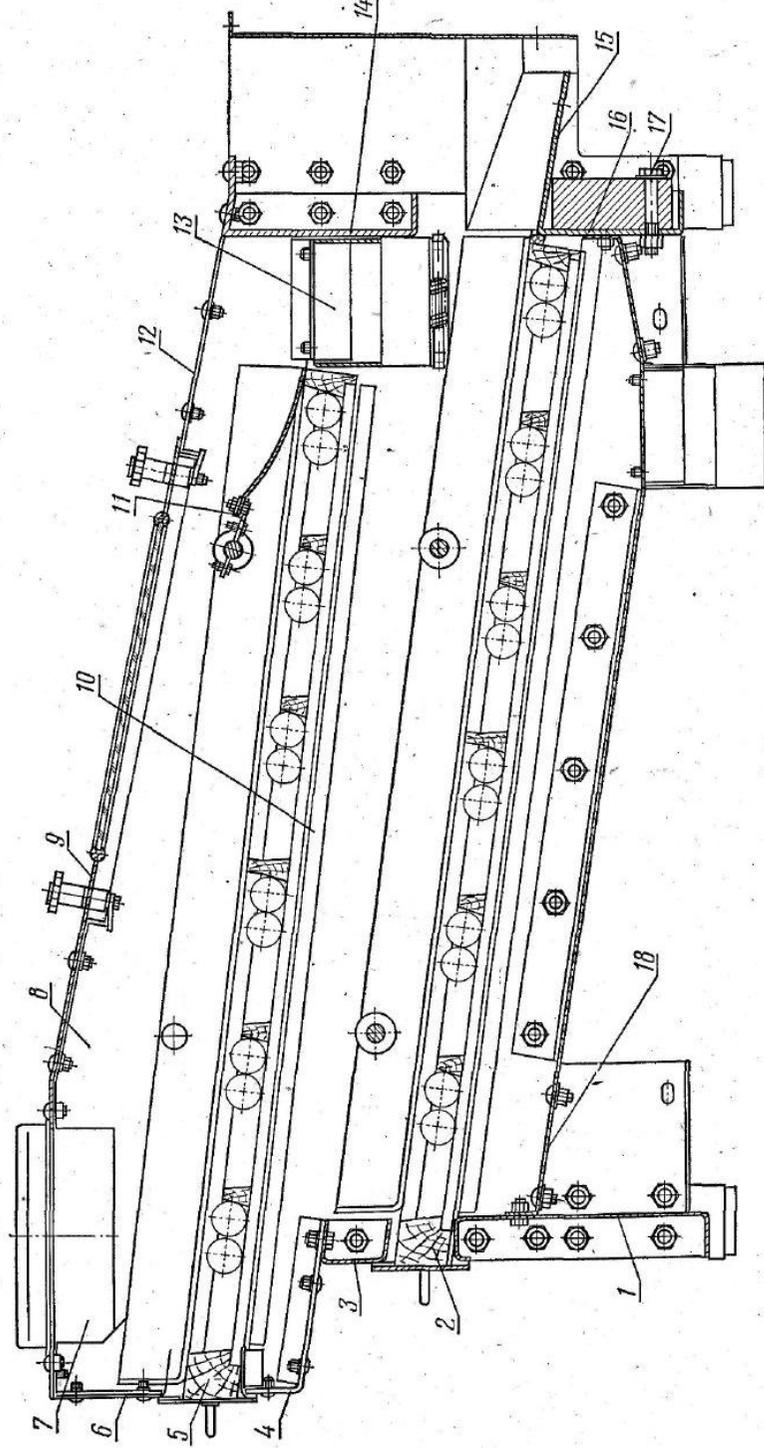


Рис. 99. Ситовый корпус зерноочистительного сепаратора БИС-12:

1, 3, 4, 6 — поперечные передние стенки; 2, 5 — ситовые рамы; 7, 13 — патрубки; 8 — боковая стенка; 9 — смотровой люк; 10 — направляющая; 11 — фарук; 12 — крышка; 14, 16 — поперечные задние стенки; 15 — скат; 17 — груз; 18 — поддон.

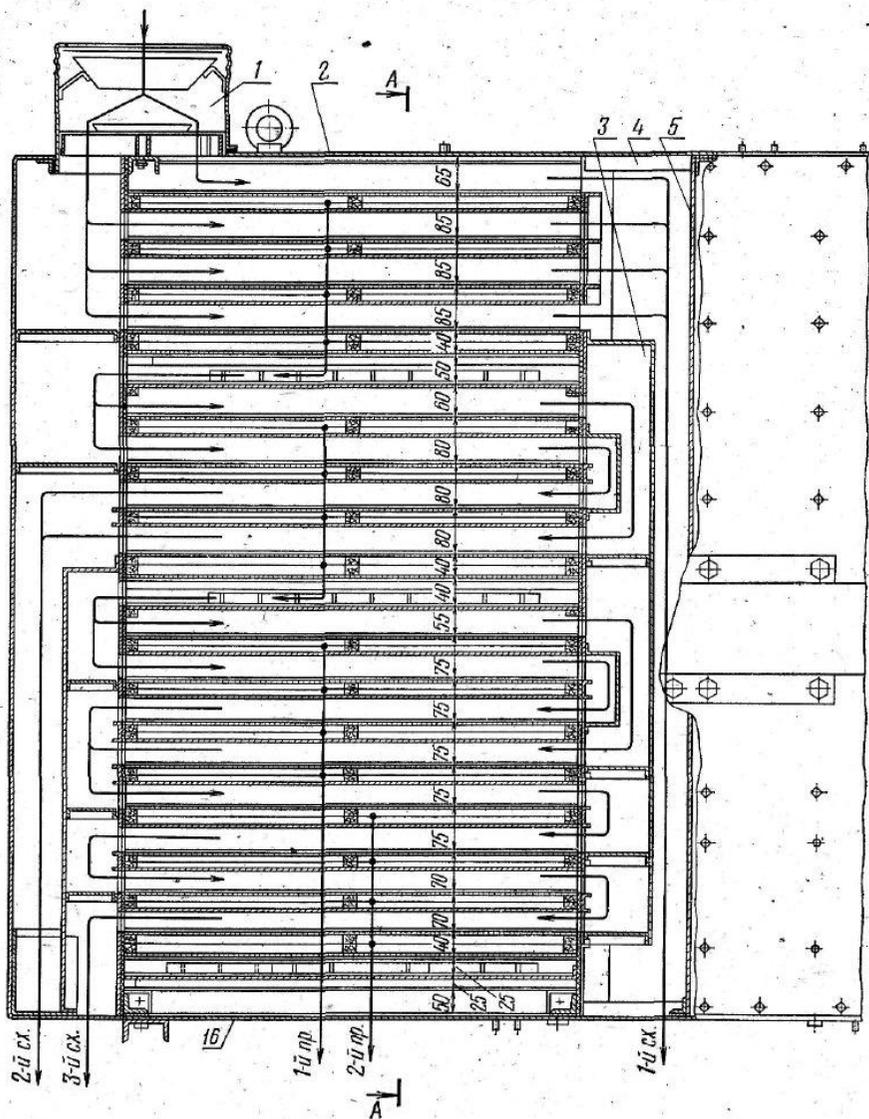


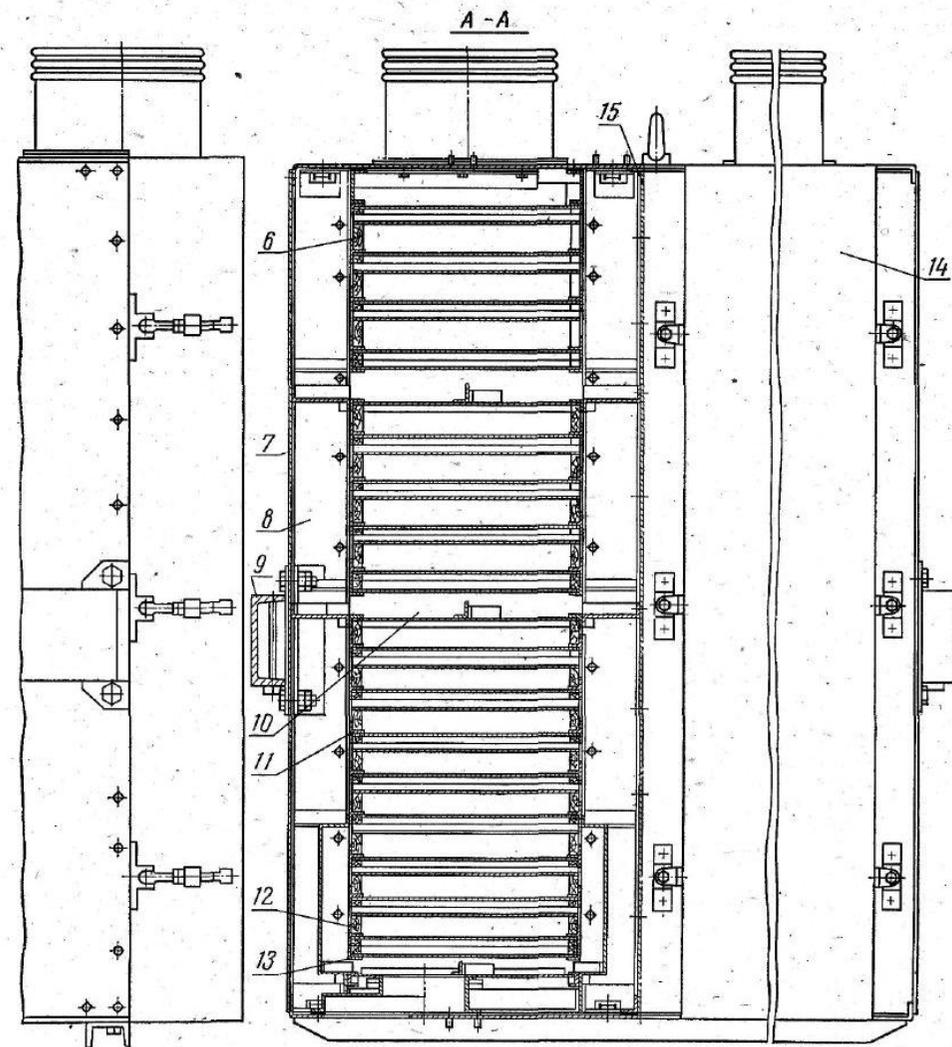
Рис. 100. Ситовой корпус рассева ЗРШ-4М:

1 — приемно-распределительное устройство; 2 — крышка; 3 — распределительная коробка; стойки-швеллеры; 9 — продольная балка; 10 — рама-сборник; 11 — тавр; 13 — направля

поддон 18 с патрубком для вывода мелких примесей. Для вывода крупных примесей (сход с верхнего сита) служит патрубок 13. Фартук 11 предотвращает попадание зерна в отходы.

Неочищенное зерно подается через патрубок 7, очищенное — выводится по скату 15. Очищают сита резиновыми шариками.

Для уравнивания машины к ситовому корпусу прикрепляют груз 17. Корпус совершает круговое поступательное движение в горизонтальной плоскости при помощи дебалансного колебателя.



4 — стальная труба; 5, 15 — листы; 6, 12 — ситовые рамы; 7 — продольная стенка; 8 — ющие уголки; 14 — дверь; 16 — днище.

Благодаря применению гнутого профиля ситовой корпус имеет небольшую массу, что позволяет снизить динамические нагрузки на его детали и обеспечить их прочность.

Корпус рассева ЗРМ — это пакет из уложенных друг на друга деревянных ситовых рам размером 600×930 мм, высотой 70, 80, 90 и 100 мм, стянутых шестью вертикальными стяжками, проходящими в отверстия поперечных швеллеров, укрепленных на верхней и нижней рамах.

Ситовой корпус посредством вертикальных продольных планок во всех рамах разделен на равные части, в каждой из которых сортируются продукты. В отсеке с двумя корпусами можно сортировать четыре различные смеси, поэтому его называют четырехприемным.

Все рамы, кроме верхней и нижней, по назначению и устройству подразделяются на три вида: с проходным дном, с распределительным дном, с распределительным и сплошным сборным (транспортирующим) дном.

В отсеке ЗРШ-4М шкафного типа основу ситового корпуса (шкафа) составляет стальная труба 4 (рис. 100), к которой приварены четыре стальных взаимно перпендикулярных листа 5 и 15, разделяющих шкаф на четыре независимые секции и образующих одновременно несущую раму отсека. Несущая рама болтами соединена с днищем 16, крышкой 2 и двумя боковыми продольными стенками 7 шкафа из листов легкого алюминиевого сплава, из которого выполнены также все металлические детали шкафа, за исключением арматуры. Между крышкой и днищем шкафа в каждой секции по углам расположены вертикальные стойки-швеллеры 8 с привинченными к ним горизонтальными направляющими уголками 13 и таврами 11, между которыми в шкаф вдвигают ситовые рамы 6, 12 и рамы-сборники 10 размером 400×800 мм.

С внутренней стороны каждой секции расположены распределительные коробки 3, поверхности которых оклеены листовым полиуретаном, с окнами для прохода продуктов. С наружной стороны рамы прижимаются внутренними стенками дверей 14, также оклеенными полиуретаном. При закрывании дверей рамы оказываются зажатыми между распределительными коробками и дверями; окончательную герметизацию этих стыков достигают при помощи затяжки дверных болтов. Стены дверей шкафа двойные; между ними образованы каналы для распределения исходной смеси по приемным ситовым рамам и для перехода сходовых продуктов с одной рамы на другую.

Внизу двери расположены два выпускных патрубка, остальные три выпускных патрубка каждой секции находятся на днище шкафа.

На крышке шкафа расположены четыре приемо-распределительных устройства 1, в которые исходная смесь поступает из приемной коробки через матерчатые рукава.

К стойкам секций, боковым стенкам шкафа, несущей раме прикрепляются продольные балки 9 из швеллера, к которым крепятся тросовые подвески.

В отсеке ЗРШ-6М — два ситовых корпуса, соединенных болтами с несущей рамой. В каждом корпусе размещены по три секции. Кроме болтов, предусмотрены дополнительные несущие связи из листа и трубчатого профиля, соединяющие корпуса и несущую раму. В каждую секцию вставлено 16 ситовых рам и три рамы-сборника. Секции в корпусе аналогичны секциям отсека ЗРШ-4М.

Глава 12. ПНЕВМОСЕПАРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Зерновые смеси разделяют по аэродинамическим свойствам компонентов в пневмосепарирующих устройствах, которые выполняются в виде самостоятельных машин (пневмосепараторов, аспираторов, аспирационных колонок), а также встроенными в другие зерноочистительные машины (воздушно-ситовые ворохоочистители и сепараторы, щеточные и обоечные машины и т. д.). Эффективной работе пневмосепарирующих устройств в машинах для первичной обработки зерна (ворохоочистителях, зерновых сепараторах первичного сепарирования) придается большое значение, поскольку до 75% всех примесей на этом этапе очистки отделяется воздушным потоком. В очищенной зерновой массе намного снижается активность процесса самосогревания, а следовательно, повышается сохранность и товарная ценность зерна.

Пневмосепарирующее устройство для очистки зерна в вертикальном воздушном потоке состоит из следующих основных узлов: приемо-распределительного устройства, пневмосепарирующего канала, относосаждающей камеры, устройства для регулирования скорости воздуха в канале, герметизирующих устройств для вывода компонентов зерновой смеси.

В комплекс пневмосепарирующих устройств входят пылесаждающие устройства и вентилятор, которые могут быть установлены на машине или автономно, обычно для обслуживания группы пневмосепарирующих устройств.

В практике зерноперерабатывающих предприятий наиболее широко распространены пневмосепарирующие устройства с вертикальным воздушным потоком, однако и внутри этого класса устройств есть сравнительно большое число модификаций, отличающихся технологическим и конструктивным решением основных узлов и компоновочных схем: кратностью использования воздуха (с замкнутым и разомкнутым циклом воздуха), способом формирования воздушного потока (нагнетанием или всасыванием), формой и конструкцией пневмосепарирующих каналов (прямоугольный, цилиндрический, кольцевой), способом подачи зерновой смеси в канал (вибрирующим лотком, одинарным или двойным грузовым клапаном, шнековым или бункерным питателем и т. п.), типом осадочной камеры (циклоны, камеры гравитационного или центробежного типа), способом регулирования расхода воздуха в канале и другими конструктивными элементами.

§ 1. Пневмосепарирующие каналы

Наибольшее влияние на эффективность пневмосепарирования оказывают форма, конструкция и геометрия каналов — основного рабочего органа пневмосепарирующего устройства. Сейчас в

специальной литературе нет четких рекомендаций по конструированию каналов.

Ряд исследователей и конструкторов придерживаются мнения о том, что наиболее полно требованиям эффективной очистки и рациональной компоновки машины отвечают каналы кольцевой формы [46]. Другие отдают предпочтение прямоугольным каналам [32].

Каналы цилиндрической формы редко применяют в машинах для очистки зерна воздушным потоком и то в основном в машинах зарубежных фирм [32]. Машины такого типа отличаются низкой производительностью и не могут конкурировать с рассмотренными устройствами на базе кольцевых и прямоугольных каналов. В каналах цилиндрической формы создаются различные условия очистки, зависящие от того, в каком месте зерно пересекает канал, что снижает общий эффект сепарирования.

Прежде чем сравнивать различные конструкции каналов, рассмотрим основные требования к ним, исходя из следующих главных условий: эффективности очистки, четкости сепарирования и рациональности конструкции.

Эффективности очистки и четкости сепарирования в канале достигают непрерывной и равномерной по длине подачи зерновой смеси в канал, выравниванием воздушного потока по длине и ширине канала, достаточной высотой канала, оптимальными размерами и формой поперечного сечения канала и одинаковыми условиями сепарирования всей поступающей смеси.

Конструктивные достоинства пневмосепарирующего канала оценивают его компактностью, простотой, удобством регулирования, причем рациональность конструктивного оформления канала нельзя определить однозначно и для пневмосепарирующего устройства, оформленного в виде самостоятельной машины (воздушные сепараторы, пневмосепараторы), и для устройства, встроенного в машину (воздушно-ситовые сепараторы и т. д.).

В каналах кольцевой формы сравнительно просто достигают равномерности потока по ширине B канала. Значительно труднее обеспечить в этих каналах равномерность потока по окружности, т. е. длине канала в связи с односторонним или местными отсосами воздуха.

Каналы кольцевой формы компактны и удобно komponуются в самостоятельных пневмосепарирующих машинах. Большое количество модификаций пневмосепараторов такого типа выпускают передовые зарубежные фирмы «Бюлер» (Швейцария) и «Миэг» (ФРГ).

В воздушно-ситовых машинах предпочтение отдают каналам прямоугольной формы.

Для питания ситовых корпусов необходимо подавать зерновую смесь равномерной лентой по их ширине, что требует питающего устройства и достаточно больших размеров для передачи в него зерна из кольцевого канала. Конструктивное решение воздушно-си-

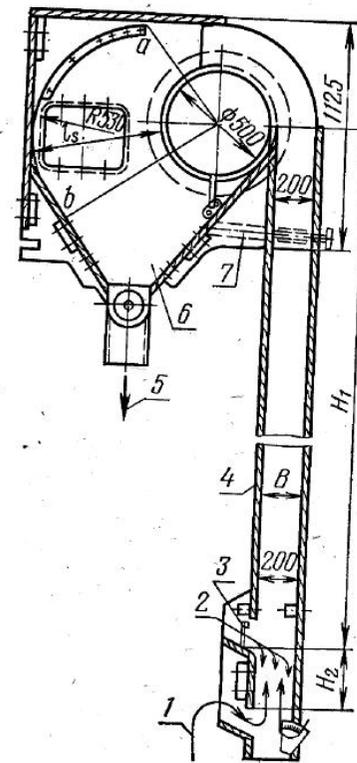


Рис. 101. Пневмосепарирующее устройство ворохоочистителя ЗВ-50:

1 — воздушный поток; 2 — зерновая смесь; 3 — питающее устройство; 4 — пневмосепарирующий канал; 5 — легкие примеси; 6 — относительноосаждающая камера; 7 — дроссельный клапан.

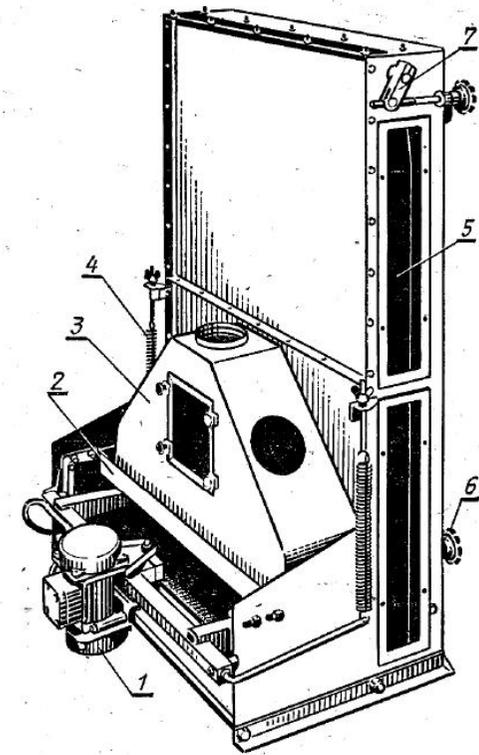


Рис. 102. Пневмосепарирующий канал фирмы «Бюлер» (Швейцария):

1 — маятниковый вибратор; 2 — виброток; 3 — приемная камера для зерна; 4 — регулируемые подвесные пружины; 5 — смотровые окна; 6 — штурупы регулирования положения подвижной стенки в канале; 7 — клапан регулирования расхода воздуха.

товой машины с двумя пневмосепарирующими каналами кольцевой формы (при приемке зерна и на выходе его из машины) практически невыполнимо.

Требованиям рациональной компоновки пневмосепарирующих устройств в воздушно-ситовых сепараторах и других зерноочистительных машинах отвечают только прямоугольные каналы (рис. 101), что полностью подтверждается конструкциями серийно выпускаемых сепарирующих машин отечественных машиностроительных заводов и зарубежных фирм. Кроме того, с каналами прямоугольной формы рациональнее komponуются относительноосаждающие камеры, в том числе и при встраивании пневмосепарирующего устройства в машину.

В прямоугольных каналах длиной в несколько метров, что характерно для высокопроизводительных машин, трудно обеспечить равномерную подачу зерновой смеси по длине. Правда, внедренные в последние годы прямо-распределительные устройства с

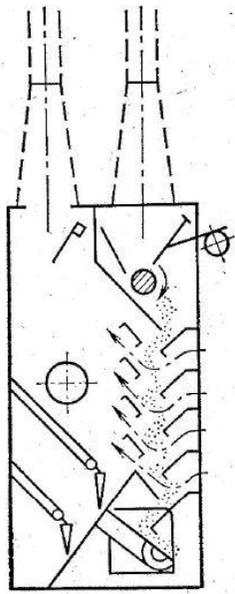


Рис. 103. Аспирационная колонка БКА с каскадной продувкой.

нейшее развитие двукратной продувки, чаще всего ее применяют в крупяном производстве для воздушного отделения ядра от пленок.

При каскадной, как и при двукратной, продувке условия входа воздуха не обеспечивают выравнивания воздушного потока в зоне сепарирования. Эффективность этих решений по сравнению с обычным прямоугольным каналом при одинаковых объемах воздуха, как показали исследования, невелика. Преимущества их заметны только при малых удельных нагрузках на канал, что, по-видимому, объясняется многократным рассеиванием малослойной сепарируемой смеси, способствующим условиям захвата легких примесей воздушным потоком.

Кольцевые и прямоугольные каналы по существу отличаются только ориентацией канала; закономерности процесса сепарирования в них одинаковы, поэтому расчет и исследование их проводят по единой методике.

Пневмосепарирующий канал характеризуется следующими основными размерами (см. рис. 101), определяющими эффективность его работы: шириной канала B , высотой верхней части канала от места поступления зерна до поворота в осадочное устройство H_1 , высотой нижней части канала от места поступления зерна до места входа воздуха в канал H_2 .

С увеличением ширины канала эффективность очистки возрастает, достигая некоторого максимума (рис. 104). Дальнейшее уве-

вибрирующим лотком намного улучшают равномерность питания. В прямоугольных каналах ряда конструкций негерметичность в местах поступления зерна, особенно у каналов второй продувки воздушно-ситовых сепараторов типа ЗСМ, обуславливает подсос воздуха и снижает эффективность очистки. Это происходит из-за недостатков в узле подачи зерновой смеси из ситового корпуса в канал, которые при некоторых конструктивных усовершенствованиях вполне разрешимы.

На рисунке 102 представлен пневмосепарирующий канал, широко применяемый в зерноочистительных машинах фирмы «Бюлер». Максимальная ширина канала 180 мм, горизонтальный ввод продукта при помощи вибрототка — это отличительные особенности канала, только подтверждающие теоретические и экспериментальные исследования (см. главу 7).

Модификация прямоугольных каналов — это двукратная и каскадная продувка.

Примером первой может служить узел сепарирования в машинах с замкнутым циклом воздуха. Каскадная продувка (рис. 103) — это даль-

ление ширины канала вызывает снижение эффективности очистки. Такая закономерность объясняется временем воздействия воздушного потока на компоненты зерновой смеси и связана с четкостью сепарирования. Время воздействия увеличивается в результате удлинения пути частиц с увеличением ширины канала.

В более широких каналах поток смеси лучше разрыхляется, большинство легких примесей успевает перейти в верхний слой и выделиться из зерна. Однако большое увеличение ширины канала при сохранении постоянной скорости воздушного потока приводит к захвату воздушным потоком части полноценного зерна и, следовательно, к снижению четкости сепарирования.

Для поддержания необходимой четкости сепарирования приходится при увеличении ширины канала уменьшать среднюю скорость воздушного потока, в связи с чем эффективность очистки уменьшается. Оптимальную ширину канала определяют в зависимости от удельной зерновой нагрузки на канал в зоне наиболее высокой эффективности. Например, при зерновой нагрузке $q=200$ кг/(см·ч) для обеспечения эффективности очистки в пределах 50—55% ширина канала должна быть не менее 200 мм.

Эффективность очистки для каждой удельной нагрузки намного возрастает с увеличением ширины канала до определенного значения: при $q=100$ кг/(см·ч) — до $B=100$ мм, при $q=300$ кг/(см·ч) — до $B=250$ мм.

Дальнейшее увеличение ширины канала незначительно повышает эффективность, в связи с чем ширину канала нецелесообразно принимать максимальной по значению эффективности из соображения экономичности процесса сепарирования.

Например, при нагрузке $q=100$ кг/(см·ч) при ширине канала $B=100$ мм достигается эффективность 60%, увеличение ширины канала до 200 мм повышает эффективность на 10%, а расход воздуха и, следовательно, энергоёмкость процесса, — вдвое. Если учесть, что основные эксплуатационные расходы при пневмосепарировании зерновой смеси — это затраты на электроэнергию, то вполне понятно, что технико-экономические показатели такой машины будут низкими.

Экономичнее будет в этом случае провести очистку на каналах с шириной $B=100$ мм последовательно в два этапа.

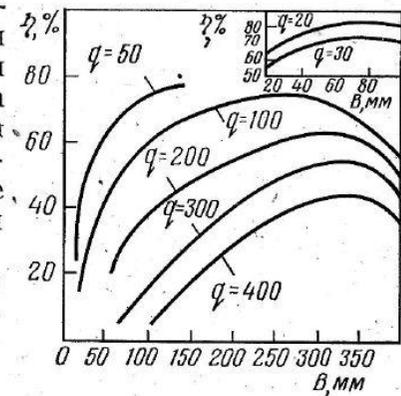


Рис. 104. Кривые зависимости эффективности очистки от ширины канала B для различного удельного нагружения (q , кг/см·ч), при постоянных $H_1=800$ мм, начальной скорости зерновой смеси $C_0=0,3$ м/с, угле входа смеси в канал $\alpha=35^\circ$ и четкости сепарирования $a=2\%$.

Из графиков (см. рис. 104) видно, что при изменении нагрузки от 50 до 200 кг/(см·ч) ширину канала следует выбирать в пределах 130—180 мм.

Длину (L , см) сепарирующего канала определяют в зависимости от конструктивных и компоновочных соображений по заданной производительности Q и выбранной удельной зерновой нагрузке q

$$L = \frac{Q}{q}$$

Для выбора вентилятора расход воздуха в пневмосепарирующем канале (Q_v , м³/с) определяется по уравнению

$$Q_v = BLv_v$$

где v_v — средняя скорость воздуха в пневмосепарирующем канале, м/с.

Целесообразно для окончательного выбора ширины канала B и определения расхода воздуха сравнительно рассмотреть при заданной эффективности несколько вариантов каналов с различными q и B и оценить их по энергоемкости и габаритным размерам.

В таблице 24 приведены данные, характеризующие влияние ширины пневмосепарирующего канала на эффективность очистки семян подсолнечника при горизонтальном вводе и удельной нагрузке 80 кг/(см·ч).

Таблица 24. Влияние ширины канала на эффективность очистки семян подсолнечника

Ширина канала, B , мм	Скорость воздушного потока, м/с	Эффективность очистки, %	Содержание нормальных семян в отходах, %	Ширина канала B , мм	Скорость воздушного потока, м/с	Эффективность очистки, %	Содержание нормальных семян в отходах, %
100	5,0	38,9	—	160	5,0	71,4	0,95
	5,5	48,7	—		5,5	82,7	5,06
120	5,0	44,4	—	180	5,0	71,5	2,68
	5,5	62,5	0,42		5,5	81,6	7,57
140	5,0	69,2	0,62	200	5,0	71,3	1,88
	5,5	78,0	0,48		5,5	84,0	5,04

Как видно из таблицы 24, эффективность очистки семян существенно повышается с увеличением ширины канала до значения $B=160$ мм: при этой ширине канала и скорости воздушного потока 5 м/с эффективность очистки равна 71,4%.

С увеличением скорости воздушного потока эффективность очистки несколько повышается, но одновременно увеличивается и содержание нормальных семян в отходах: при скорости воздушного потока 5,5 м/с в каналах шириной 160 мм эффективность очистки

достигает 82,7%, однако содержание нормальных семян в отходах (5,06%) превышает норму. Оптимальными параметрами следует считать $B=160$ мм и $v_v=5$ м/с.

В комплектных установках в зависимости от нагрузочных условий применяют каналы с шириной 120—200 мм.

В каналах с большой шириной, например на ворохоочистителях ЗВ-50, хотя и несколько увеличился расход воздуха, однако они обеспечивают достаточно высокую и устойчивую эффективность (до 75—80%) на первой операции очистки свежесобранного зерна.

Высота верхней части канала H_1 (см. рис. 101) существенно влияет на эффективность очистки и главным образом связана с четкостью сепарирования. Малые значения H_1 не позволяют поддерживать достаточно высокую скорость воздушного потока в связи с заносом полноценного зерна в осадочную камеру.

Как уже было отмечено, скорости витания полноценных зерновок колеблются в больших пределах, часть взвешенных в зоне сепарирования зерновок витает на расстоянии до 200 мм и выше от места поступления зерновой смеси, непрерывно поднимаясь и опускаясь в зависимости от ориентации их в воздушном потоке. Неравномерность потока еще больше увеличивает зону витания, а некоторая часть зерновок, попав в зону повышенных скоростей, уносится вместе с легкими примесями.

На рисунке 105 приведены данные об эффективности очистки и соответствующие скорости воздушного потока в зависимости от высоты верхней части канала при нагрузке в 50 и 100 кг/(см·ч) и ширине канала $B=130$ мм. Увеличение высоты канала позволяет несколько повысить рабочую скорость воздуха, увеличивая эффективность очистки. Например, при высоте канала $H_1=1500$ мм и нагрузке на канал, равной 100 кг/(см·ч), скорость воздуха можно увеличить до 6,2 м/с, эффективность очистки при этом составляет 73% против 61% при высоте канала $H_1=500$ мм и скорости воздуха 5,3 м/с. Четкость сепарирования и прочие условия в этих случаях равны. Эффективность очистки, как видно из рисунка 105, повышается с увеличением высоты канала до 1500—1600 мм; этими значениями и следует ограничиваться, принимая предельную высоту канала. Нижнее предельное значение высоты канала H_1 обычно принимают не менее 800 мм.

Часто конструктор ограничен габаритными размерами машины, поэтому приходится идти на уменьшение высоты канала H_1 , заведомо закладывая низкую эффективность пневмосепарирующего устройства. Высота H_1 каналов первой продувки большинства воздушно-ситовых машин отечественных заводов и зарубежных фирм

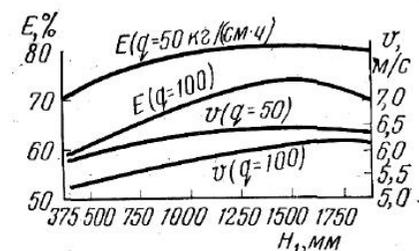


Рис. 105. Кривые зависимости эффективности очистки E от высоты верхней части канала H_1 .

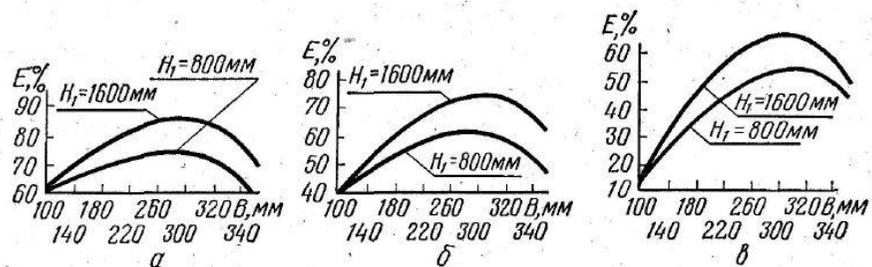


Рис. 106. Кривые зависимости эффективности очистки E от ширины канала B при различной высоте H_1 канала при следующих удельных нагрузках q на канал:

a — $100 \text{ кг/(см}\cdot\text{ч)}$; b — $200 \text{ кг/(см}\cdot\text{ч)}$; v — $300 \text{ кг/(см}\cdot\text{ч)}$.

350—500 мм, в связи с чем у них либо недостаточная эффективность очистки, либо невысокая четкость сепарирования.

Кривые зависимости эффективности очистки от ширины канала при $H_1 = 800 \text{ мм}$ и $H_1 = 1600 \text{ мм}$, полученные в результате эксперимента для различных удельных нагрузок q при одинаковой четкости сепарирования (рис. 106), иллюстрируют общую тенденцию повышения эффективности очистки с увеличением высоты канала H_1 . Одновременно ясно видно большое увеличение эффективности при увеличении ширины канала B . Например, изменение ширины канала от 100 до 200 мм при нагрузке $q = 300 \text{ кг/(см}\cdot\text{ч)}$ увеличивает эффективность очистки в канале с $H_1 = 1600 \text{ мм}$ на 30%. Ширина канала 200 мм и высота более 1600 мм приняты сейчас для всех высокопроизводительных машин.

Высота нижней части канала H_2 также существенно влияет на эффективность процесса сепарирования. Она связана главным образом с рациональным подводом воздуха: от конструкции нижней части канала и высоты H_2 зависит выравнивание воздушного потока. Как показали эксперименты, при любом способе подвода воздуха в канал (с одной или с двух сторон) прямой участок канала перед зоной сепарирования выравнивает поле скоростей по ширине канала. С увеличением высоты канала H_2 выравнивание потока увеличивается. Исследованиями установлено, что для каналов шириной 100—200 мм оптимальная высота нижней части канала равна 130—180 мм. Соотношение между шириной канала B и высотой его нижней части H_2 : $H_2 = (1,5-2)B$.

Данные исследований показывают, что с увеличением H_2 , например от 230 до 430 мм, повышается эффективность очистки примерно на 5—8%, поэтому в конструкциях, где допустимо некоторое увеличение габаритных размеров, увеличением высоты H_2 не следует пренебрегать.

Для определения влияния способов подвода воздуха в пневмосепарирующий канал на выравнивание потока и эффективность сепарирования были проведены исследования четырех различных

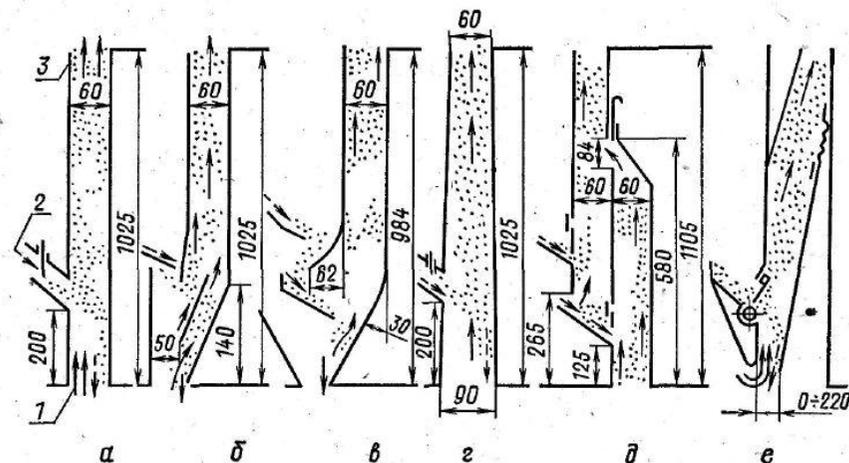


Рис. 107. Экспериментальные пневмосепарирующие каналы (зерновые):
 a — прямоугольный постоянного сечения; b, v — наклонные с двойной продувкой и поворотным клапаном; g — конический, сужающийся вверх; g — двойной; e — клиновидный, расширяющийся вверх; 1 — воздух; 2 — зерновая смесь; 3 — воздух с легкими примесями.

схем: односторонний подвод воздуха со стороны входа зерновой смеси, односторонний подвод воздуха с противоположной стороны; двусторонний подвод воздуха и подвод воздуха через выходное сечение канала. При этом высота нижней части канала H_2 составляла 250 мм, $B = 200 \text{ мм}$ и $q = 200 \text{ кг/(см}\cdot\text{ч)}$.

Наиболее низкий эффект сепарирования был при одностороннем подводе воздуха со стороны, противоположной входу зерна. При двустороннем подводе воздуха незначительно повышается эффект очистки. Эффект очистки увеличивается на 10—15% при подводе воздуха со стороны входа зерна и прочих равных условиях, а подвод воздуха снизу увеличивает его еще на 5—7%. При подводе воздуха со стороны, противоположной приемке зерна, поле скоростей группируется таким образом, что более высокие скорости находятся в зоне менее разреженного потока зерновой смеси, выравнивание поля скоростей низкая и надлежащей эффективности очистки не достигается.

Среди исследователей процесса пневмосепарирования имеются противоречивые мнения о целесообразной форме поперечного сечения канала в связи с эффективностью сепарирования. Некоторые из них отдают предпочтение каналу клиновидного сечения, расширяющемуся вверх. Другие [44] отмечают большую эффективность прямоугольных каналов постоянного сечения (рис. 107, a) и даже конических, сужающихся вверх (рис. 107, g).

Клиновидный канал (рис. 107, e), на основе которого созданы последние серийные конструкции пневмосепараторов БПС, предусматривает обработку зерна в зоне сепарирования при малой его ширине и большой скорости воздушного потока, превышающей скорость витания, так называемой «острой» струей. В зоне сепариро-

вания образуется «кипящее» состояние некоторой части зерновой смеси. Скорости воздушного потока уменьшаются с увеличением высоты канала, и полноценные зерновки, захваченные воздушным потоком, вновь выпадают в зону сепарирования и далее в зерновой поток. Такая схема сепарирования разработана для уменьшения расхода воздуха и согласования его с объемами воздуха, требуемыми для пневмотранспортирования. Однако этот способ не обеспечивает высокой эффективности очистки, так как по существу он сводится к сепарированию в узких каналах с достаточно высокими удельными нагрузками.

Производственные испытания пневмосепараторов подтвердили необходимость увеличения ширины канала в нижней его части до 120—130 мм и соответственно снижения скоростей воздуха в зоне сепарирования. Установка в верхней части клиновидного канала наклонной стенки и расширение его нижней части привели к модификации его в прямоугольный, несколько наклонный (см. рис. 107, е), с незначительно расширенной частью в среднем его сечении. Максимальный эффект на этих каналах для пневмосепараторов БПС-10 был получен при $q=110$ кг/(см·ч), $B=120$ мм, $B_{ср}=140$ мм (ширина канала в среднем сечении) и составляет 72—80%, для пневмосепараторов БПС-2,5 — при $q=50$ кг/(см·ч), $B=100$ мм, $E=76—82\%$.

Влияние формы поперечного сечения и конструкции канала на эффективность сепарирования экспериментально исследовали на каналах нескольких разновидностей, конструктивное решение которых повторяет или подобно пневмосепарирующим каналам различных современных пневмосепарирующих машин. Каналы подключали к экспериментальному воздушному сепаратору, обеспечивающему возможность широкого варьирования аэродинамическими, технологическими и конструктивно-установочными параметрами пневмосепарирующего устройства.

Исследования позволили сравнить каналы прямоугольной (традиционной) формы, применяемые в воздушно-ситовых сепараторах, наклонные каналы с двойной продувкой и поворотным клапаном (рис. 107, б, в), применяемые в воздушных сепараторах и аспирационных колонках, конический канал (рис. 107, г), двойной канал (рис. 107, д) и т. д. На рисунке 108 приведены кривые зависимости эффективности очистки зерна в этих каналах от расхода воздуха при засоренности зерна 5% и воздушных режимах, при которых унос полноценных зерен в отходы не превышает установленную норму. Для сравнения на этом же рисунке приведены данные испытаний для расширяющихся конических каналов. Исследования показали, что максимальную эффективность очистки достигают в вертикальном прямоугольном канале постоянного сечения и коническом канале, сужающемся вверх.

Было установлено, что оптимальная скорость воздушного потока в вертикальном пневмосепарирующем канале постоянного сечения составляет около 7 м/с. При удельной зерновой нагрузке,

равной 50 кг/(см·ч) и засоренности 2%, эффективность очистки составила 79,2%, при этом содержание нормального зерна в отходах не превышало 0,7%.

С увеличением удельной нагрузки от 25 до 100 кг/(см·ч) эффект очистки зерна с засоренностью 5% при скорости воздушного потока в канале 7 м/с уменьшается от 72,4 до 50,7%.

В пневмосепарирующем канале с двойной продувкой при скорости воздушного потока 7 м/с, удельной нагрузке 50 кг/(см·ч) и засоренности 5% эффект очистки составил 58,4%. Дальнейшее возрастание скорости воздушного потока вызывает значительный унос нормального зерна в отходы. При увеличении удельной нагрузки от 50 до 200 кг/(см·ч) эффект очистки уменьшается от 58,4 до 30,4%.

Эффект очистки в пневмосепарирующем канале с поворотным клапаном при $v_b=7$ м/с, $q=50$ кг/(см·ч) и засоренности 2% составил 57% а при засоренности 5% — 45,7%. При этом количество нормального зерна в отходах не превышало 1,5%.

В коническом сужающемся канале при скорости воздушного потока 3,7—5,7 м/с в нижнем сечении канала и 4,6—7,2 м/с — в зоне сепарирования и удельной нагрузке 50 кг/(см·ч) эффект очистки зерна в среднем составил: при засоренности зерна 2% — 85,5%, а при засоренности 5% — 75,9%. Расход воздуха при этом был несколько большим, чем в других каналах, однако нормальных зерен в отходах не было обнаружено.

В двойном пневмоканале при удельной нагрузке 50 кг/(см·ч) и засоренности зерна 5% был получен эффект очистки 74,1% при содержании нормального зерна в отходах 0,9%, т. е. ожидаемого существенного повышения эффекта очистки в результате двукратной последовательной воздушной очистки зерна достигнуто не было.

Эффект сепарирования в коническом расширяющемся канале (по данным производственных испытаний) при той же ширине канала в зоне сепарирования ($B=60$ мм), удельной нагрузке, равной 62,5 кг/(см·ч), и скорости воздуха в зоне сепарирования 8,0—8,5 м/с составил 63—65% при содержании полноценного зерна в отходах около 1,2%.

Установка в верхней части канала наклонной стенки, расширение, нижней части канала с одновременным снижением скорости воздуха в зоне сепарирования повышают эффект очистки примерно

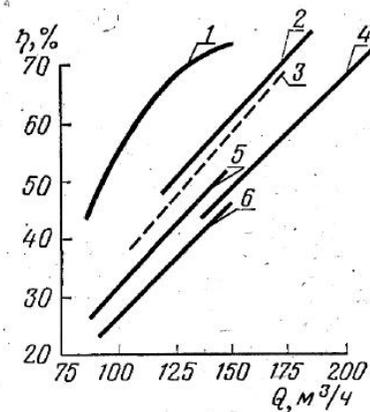


Рис. 108. Кривые зависимости эффективности очистки зерна от расхода воздуха в экспериментальных каналах:

1 — прямоугольный постоянного сечения; 2 — конический, сужающийся вверх; 3 — конический, расширяющийся вверх; 4 — двойной; 5 — наклонный; 6 — с поворотным клапаном.

на 10—15%, однако большей эффективности очистки при прочих равных условиях в рассматриваемых каналах по сравнению с прямоугольным и коническим, сужающимся вверх, не достигается.

При исследовании процесса пневмосепарирования семян подсолнечника наряду с выявлением основных закономерностей экспериментально проверили и влияние формы поперечного сечения канала на эффективность сепарирования. Из данных таблицы 25 видно, что все три типа клиновидных каналов сравнительно с прямоугольным менее эффективны, в том числе и при более высоком расходе воздуха.

Таблица 25. Эффективность пневмосепарирования семян подсолнечника в каналах различной формы

Тип канала	Скорость воздушного потока в зоне сепарирования, м/с	Расход воздуха, м³/ч	Эффективность очистки, %	Содержание нормальных семян в отходах, %
Клиновидный, расширяющийся вверх	7,15	850	47,3	—
	8,75	1030	52,3	2,30
	9,34	1100	59,3	3,50
То же	7,06	940	49,3	1,30
	7,40	1030	51,2	2,70
Клиновидный, сужающийся вверх	5,20	1190	53,0	6,50
	4,70	1070	36,5	—
Прямоугольный с горизонтальным вводом семян, $B=160$ мм	5,00	862	71,4	0,95

Условия ввода зерновой смеси в пневмосепарирующий канал. Многочисленными экспериментальными исследованиями [32, 46] было показано, что от условий ввода зерновой смеси в канал, главным образом от величины начальной скорости C_0 и направления вектора скорости зерновок, во многом зависит эффективность процесса пневмосепарирования. Зерновую смесь в канал современных пневмосепарирующих машин (рис. 109) вводят в основном тремя

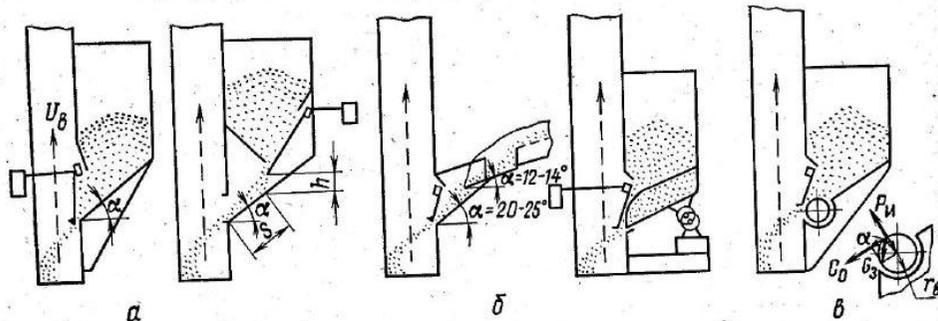


Рис. 109. Способы подачи зерновой смеси в пневмосепарирующий канал: а — самотеком по наклонной направляющей; б — вибрирующим лотком; в — рифленным питающим валком.

способами: самотеком по наклонной направляющей под действием гравитационных сил и подпора зерна, вибрирующим лотком, а также рифленным питающим валком-побудителем.

Как правило, механизмы подачи зерновой смеси в канал не предусматривают регулирование скорости ввода зерновок в канал и ориентации вектора этой скорости, хотя возможности к этому есть, например изменением параметров вибрации лотка или кинематики валкового питающего устройства. Эти параметры при конструировании подчиняют, с одной стороны, условиям равномерной подачи зерновой смеси во времени, с другой — равномерному распределению зерна по фронту подачи.

Результаты экспериментальных данных зависимости эффекта очистки от начальной скорости (рис. 110) подтверждают мнение о том, что оптимальное значение скорости зерновок C_0 находится в пределах 0,3—0,4 м/с.

Следует отметить, что при конструировании пневмосепарирующих устройств на условия ввода зерновой смеси в канал почти не обращают внимания. Это подтверждается большими колебаниями значений $C_0=0,3—1,2$ м/с в различных машинах. В питающих устройствах с грузовыми клапанами различных модификаций начальная скорость главным образом определяется углом наклона направляющей, который выбирают близким к углу трения зерна о металлический скат, т. е. 25—35°, что обеспечивает скорость входа зерновой смеси в пределах 0,25—0,50 м/с. Начальную скорость ввода зерновой смеси C_0 в устройствах, приведенных на рисунке 109, а, определяют по следующей формуле [63]:

$$C_0 = \sqrt{2gS (\sin \alpha - f \cos \alpha) + v_0^2}$$

где S — путь зерна по направляющей, м; α — угол наклона направляющей, град; f — коэффициент трения; $v_0 = \sin \alpha \sqrt{2gh}$ — начальная скорость зерновки на наклонной направляющей, м/с; h — высота свободного падения, м.

Клапанные приемно-распределительные устройства отличаются ненадежностью в работе, большой инерционностью. В эксплуатации часто наблюдаются случаи, когда клапан открывается и бункер опорожняется за короткое время, только после этого клапан возвращается в первоначальное положение. При такой подаче скорость ввода зерновой смеси в канал намного увеличивается и эффективность очистки снижается. Объясняется это примерным равенством моментов сил, открывающих клапан, и противодействующих сил. Установка клапанов даже с небольшим перекосом увеличивает мо-

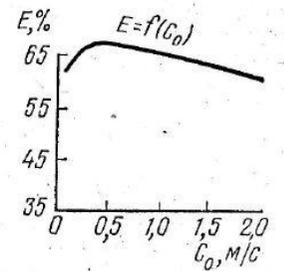


Рис. 110. Кривая зависимости эффективности очистки зерна от начальной скорости ввода зерновой смеси в канал при разной скорости воздушного потока.

менты трения в опорах, что снижает чувствительность клапанов. Такие устройства применяют все реже. Сейчас клапаны комбинируют с принудительным питанием в виде вибрирующих лотков и питающих валков, применяют двухклапанную систему с клапан-датчиком высокой чувствительности.

На рисунке 109, б показаны устройства с вибрирующим лотком: в первом случае — это колеблющийся ситовой корпус (обычно для подачи зерна в каналы второй продувки в воздушно-ситовых сепараторах), во втором — специальный вибрирующий лоток. По ситовому корпусу зерновая смесь со скоростью 0,2—0,3 м/с поступает в приемный носок канала с несколько большим уклоном направляющей по сравнению с углом наклона сит. Таким образом, скорость входа в канал сохраняется в тех же пределах. Опыты показали, что скорость C_0 в таких устройствах близка или несколько меньше оптимального значения.

Параметры вибрации автономных вибрирующих лотков позволяют поддерживать значение C_0 в оптимальных пределах. Подача зерновой смеси в канал при помощи вибрирующих лотков способствует также самосортированию зерновой смеси и вводу ее в канал в виде двухслойного потока, однако для этого нужно создать определенные условия.

В зерноочистительных машинах фирмы «Бюлер» (Швейцария) большое внимание уделяют устройствам для подачи зерновой смеси в канал. Даже пневмосепарирующие каналы зерновых сепараторов, где наиболее удачны условия подачи зерна в канал, оборудованы автономным вибрлотком (см. рис. 102), что позволяет обеспечить оптимальные условия ввода зерновой смеси в канал.

В устройствах с питающим валком (см. рис. 109, в) скорость C_0 поддерживают кинематическим режимом валка. Обозначив массу зерновки G_3 , угловую скорость валка ω_B , радиус валка r_B , угол подачи зерновки в канал α , определим значение скорости C_0 из условия равенства центробежной силы $P_{ц}$, действующей на зерновку, и радиальной составляющей силы тяжести

$$\frac{G}{g} \omega_B^2 r_B = G_3 \cos \alpha$$

или, выразив угловую скорость валка через C_0 , получим

$$\frac{C^2}{r_B} = g \cos \alpha \text{ и } C_0 = \sqrt{gr_B \cos \alpha} \approx 3,14 \sqrt{r_B \cos \alpha}.$$

В пневмосепараторах типа БПС радиус питающего валка $r_B = 0,04—0,042$ м, а угол ввода $30—45^\circ$, что обеспечивает вход зерновой смеси в канал со скоростью $C_0 = 0,43—0,50$ м/с. К наиболее рациональным конструкциям питающих устройств, соответствующих требованиям оптимального ввода зерновой смеси в канал, следует отнести устройства с вибрирующим лотком, а также двухклапанный

механизм с питающим валком, применяемым в пневмосепараторах типа БПС.

Регулирование скорости воздушного потока в пневмосепарирующих каналах. Один из основных параметров регулирования режимов воздушного сепарирования, связанных с качественно-количественными изменениями сепарируемых смесей, — это скорость воздушного потока в зоне сепарирования и по высоте канала. В устройствах с неизменяемой геометрией канала (воздушно-ситовых сепараторах, зерноочистительных агрегатах, аспираторах и аспирационных колонках) скорость воздушного потока изменяют путем регулирования расхода воздуха в канале при помощи различных шиберных и дроссельных устройств. Обычно этими устройствами можно изменять скорость от нуля до максимума, рассчитываемого, исходя из назначения машины. Например, для сепарирования зерновых смесей пшеницы, ржи, ячменя, т. е. наиболее распространенных зерновых культур, предельное значение v_B устанавливают в области 9—10 м/с. При сепарировании зернобобовых культур и кукурузы это значение увеличивают до 20 м/с и более в соответствии со скоростями витания и коэффициентом запаса $K_3 = 1,1—1,3$.

В пневмосепарирующих устройствах с изменяемой геометрией канала скорость воздушного потока регулируют изменением формы поперечного сечения по высоте канала при постоянных объемах перемещаемого воздуха. В свою очередь, это не исключает необходимости регулировать расход воздуха в канале дросселирующими устройствами. Однако регулирование воздушного режима, связанное с настройкой технологического процесса сепарирования в машинах этого типа, сводится в основном к изменению сечения канала.

В ранее выпускаемых пневмосепараторах ЗПА (рис. 111, а) подвижная стенка 1 перемещается параллельно стенкам канала, образуя с рычагами 2 и наружной стенкой 6 (неподвижной опорой) шарнирный параллелограмм.

Более совершенной конструкцией отличается подвижная стенка в сепараторах БПС (рис. 111, б). Она позволяет изменять ширину канала не только в зоне сепарирования, но и по высоте благодаря двум степеням свободы в плоскости, т. е. изменять форму поперечного сечения канала. Это достигнуто в результате соединения стенки 1 с двумя регулировочными винтами 9 через пазовые отверстия в специальных ребрах, придающих стенке дополнительную жесткость. В верхней части стенка гибким элементом 5 соединена с наружной стенкой канала 6. Перемещение стенки маховиками 8, образующими с регулировочными винтами винтовую пару, обеспечивает достаточную легкость в обслуживании. Ширину канала в зоне сепарирования можно регулировать в достаточно больших пределах, например в сепараторе БПС-10 от 100 до 210 мм. Кроме того, в сепараторах типа БПС дроссельным клапаном 7 регулируют расход воздуха в канале, пропускную часть воздуха, поступающего в

Потери давления в зерновой струе связаны с величиной удельной нагрузки и с достаточной для практических целей точностью определяют по формуле

$$\Delta H_3 = 1,3 \frac{qv_a^2}{B}$$

Сопротивление выравнивающей решетки зависит от ее конструкции и размеров. Потери давления в решетках колеблются в пределах 30—60 Н/м².

Потери давления в пневмоканалах невелики и обычно составляют 100—150 Н/м².

§ 2. Каскадные пневмосепарирующие каналы

Пневмосепарирование в технологическом процессе крупных заводов представлено значительно шире, чем на других зерноперерабатывающих производствах, и значимость его в эффективном ведении процесса более существенна. Например, Правила организации и ведения технологического процесса на крупных предприятиях предопределяют после первого шелушения обязательное двукратное пневмосепарирование; низкая его эффективность ухудшает условия дальнейшего шелушения и сепарирования, повышает циклооборот продукта.

В процессах пневмосепарирования крупных культур каскадные пневмосепарирующие устройства широко распространены, хотя по эффективности они не превосходят пневмосепарирующие устройства других типов, например с вертикальным каналом [32]. Их отличительные особенности — это небольшие габаритные размеры и компактность конструкции. Каскадные каналы практически исследованы не были, научно обоснованных данных о выборе конструктивных параметров, технологических и аэродинамических режимов нет.

Каскадные колонки рекомендуются в основном использовать на контрольных операциях [53]. В то же время ряд фирм, в том числе «Генри Саймон» (Англия), «Хэпт-Картер» (США), предприятия ГДР и другие, применяют каскадные пневмосепарирующие устройства в виде самостоятельных машин или встроенные в зерновые сепараторы. Применяют в основном три типа устройств, реализующих процесс каскадного сепарирования: с вертикальным воздушным потоком, как правило, с двумя каскадами (аспирационные колонки АК-500, аспираторы БДА, БВЗ, фирмы «Генри Саймон»); с наклонным воздушным потоком (колонки БКА, ТSM, «Окрим», М2С-50, аспираторы фирмы «Хэпт-Картер» и другие); с поперечным потоком, распространенными в зерноочистительных машинах сельскохозяйственного назначения, например в сепараторах «Вибрант К-521», «Петкус» (ГДР).

Наиболее компактны и перспективны каскадные колонки с наклонным воздушным потоком. Исследования каскадных колонок

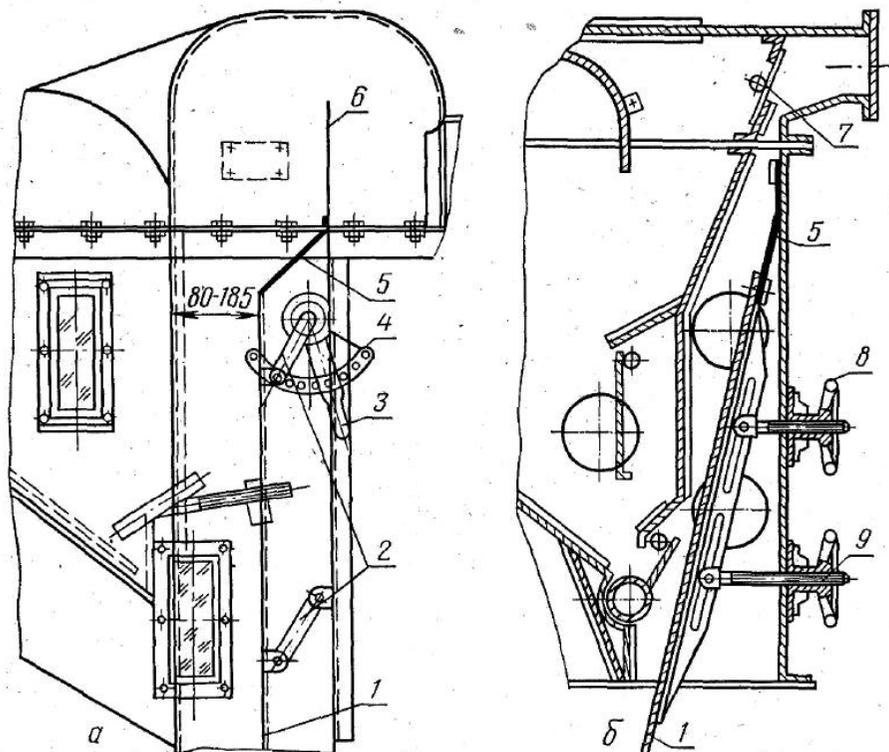


Рис. 111. Устройство для регулирования скорости воздуха в пневмосепарирующих каналах с изменяемой геометрией:

а — с вертикальной стенкой; б — с наклонной стенкой; 1 — подвижная стенка; 2 — рычаги; 3 — рычаг-рукоятка; 4 — сектор; 5 — гибкий элемент; 6 — наружная стенка; 7 — дроссельный клапан; 8 — маховик; 9 — регулировочный винт.

сепаратор, — через обводной канал. Это позволяет в больших пределах изменять воздушный режим, добиваясь оптимальных условий сепарирования зерновой смеси.

Аналогичную конструкцию подвижной стенки применяют и в пневмосепарирующих каналах фирмы «Бюлер» (см. рис. 102), имеющих, кроме того, шиберный клапан 7 для регулирования расхода воздуха в канале.

Потери давления H_K в прямоугольных и кольцевых пневмосепарирующих каналах складываются из потерь давления в канале ΔH_K , зерновой струе ΔH_3 и выравнивающей решетке ΔH_p .

Потери давления в канале складываются из потерь по длине канала и на входе воздуха в канал и зависят от конструктивного решения нижней части канала и его длины.

На основе опытных данных потери давления приблизительно будут равны

$$\Delta H_K = (1,0 - 1,1)v^2$$

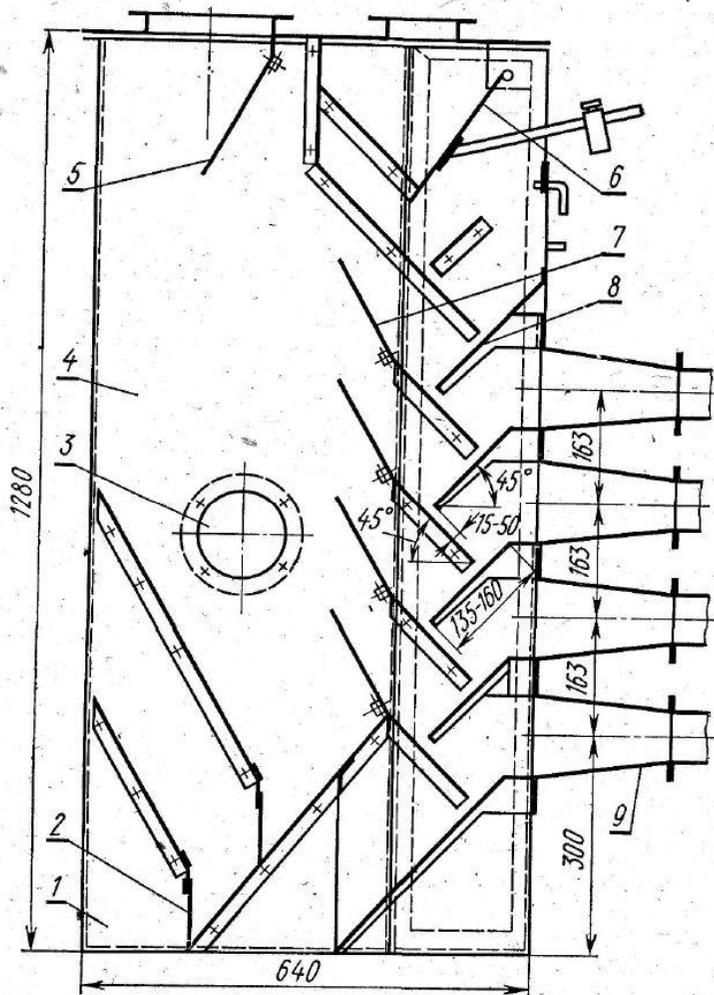


Рис. 112. Экспериментальное устройство с каскадным пневмосепарированием:

1 — корпус; 2 — лепестковый клапан; 3 — смотровое окно; 4 — осадочная камера; 5 — клапан; 6 — грузовой клапан; 7 — система поворотных клапанов; 8 — наклонная плоскость (скат); 9 — коллектор.

позволили определить основные факторы, влияющие на эффективность каскадного пневмосепарирования: расход воздуха, удельная зерновая нагрузка, конструктивные параметры. Длина экспериментального пневмосепарирующего канала принята равной 200 мм. Была проведена сравнительная оценка каскадных колонок и пневмосепарирующих устройств с вертикальным прямоугольным каналом.

Схемой экспериментальной установки (рис. 112) предусмотрена возможность исследования различных типов устройств с широким варьированием нагрузочными, аэродинамическими и конструктивно-установочными параметрами и осуществления технологического

контроля. Эффективность процесса сепарирования оценивали по эффекту очистки E и четкости сепарирования a .

Исследования были проведены на продуктах шелушения: гречихи с влажностью 11—12%, содержанием несвязанной лузги 10,67—14,65% и проса влажностью 16,0—16,2% с содержанием несвязанной лузги 13,34—13,94%. Качество образцов основных продуктов и отходов определяли в соответствии с ГОСТ 275—56 — «Методы определения качества крупы».

При расходе воздуха на один каскад в среднем около 110 м^3 (табл. 26) для эффективного ведения процесса сепарирования необходимо не менее четырех последовательно связанных каскадов, при этом эффективность сепарирования при различных условиях составит 90—95%. Несколько выше результаты были получены при сепарировании продуктов шелушения проса — до 98% (табл. 27).

Таблица 26. Эффективность сепарирования продуктов шелушения гречихи при различном числе каскадов (содержание лузги 13,6%)

Число работающих каскадов	Удельная нагрузка, кг/(см·ч)	Расход воздуха				Содержание лузги в готовом продукте, %	Количество нормального зерна в отходах, %	Эффективность сепарирования, %	
		удельный, м ³ /т	в каскаде, м ³ /ч						
			1-м	2-м	3-м				4-м
1	29,5	185	0	0	0	110	5,16	8,96	62,1
2	29,5	360	0	0	114	110	4,31	1,87	68,3
3	30,1	535	0	109	116	99	2,28	0,98	83,2
4	29,5	750	110	112	115	97	1,20	1,60	91,2

Таблица 27. Влияние размеров зоны сепарирования на эффективность разделения продуктов шелушения проса

Расстояние между скатами, мм	Расход воздуха, м ³ /ч	Удельная нагрузка, кг/(см·ч)	Эффективность сепарирования, %	Количество нормального зерна в отходах, %	Устойчивость режима работы каскадного канала
15	520	23,8	89,5	16,9	Неустойчивый, продукт накапливается на скатах
25	570	26,7	98,2	2,0	То же
32	595	29,5	98,8	1,8	Устойчивый, наблюдается накопление продукта
40	595	33,5	97,0	0,4	Устойчивый, накопление незначительное
50	607	33,5	70,0	0,3	Устойчивый, накопления нет
50	695	32,8	93,2	2,8	То же

Данные таблицы 27 характеризуют влияние размеров зоны сепарирования (расстояние между наклонными скатами показано на рисунке 112) на эффективность пневматического разделения продуктов шелушения. Из данных таблицы 27 видно, что размеры зоны

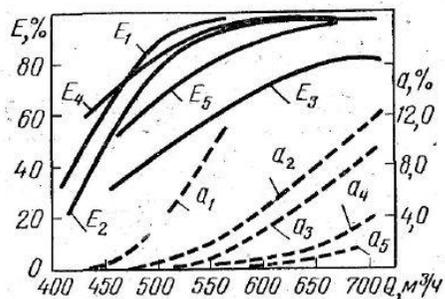


Рис. 113. Эффективность пневмосепарирования продуктов шелушения гречихи и проса (наклонный ввод) в зависимости от расхода воздуха:

E_1, a_1 — гречиха, расстояние между скатами 25 мм; E_2, a_2 — то же, 40 мм; E_3, a_3 — то же, 50 мм; E_4, a_4 — просо, расстояние между скатами 40 мм; E_5, a_5 — то же, 50 мм.

различных операций (контроля, разделения продуктов шелушения, очистки) и культур.

В процессе исследований было установлено влияние расхода воздуха на эффективность сепарирования и оптимальные его значения при четырех сепарирующих каскадах. Из рисунка 113 видно, что максимальный эффект сепарирования продуктов шелушения гречихи ($E=92-93\%$, $a=2,0-2,2\%$) достигается при расходе воздуха 550—570 $\text{м}^3/\text{ч}$, содержание несвязанной лузги при этом колебалось от 10,6 до 14,7%, т. е. концентрация аэродинамически легких примесей была значительной. Расход воздуха на 1 т сепарируемого продукта составляет 910—150 м^3 .

При сепарировании продуктов шелушения проса с содержанием легких примесей 13,3—13,9% (см. рис. 113, кривые E_4, a_4) оптимальный расход воздуха несколько выше (590—610 $\text{м}^3/\text{ч}$) и обеспечивает эффективность до 97% ($a < 1,0\%$). Удельный расход воздуха составляет 980—1020 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Изменение удельной нагрузки на каскадный канал в пределах практически применяемых (15—45 $\text{кг}/(\text{см}\cdot\text{ч})$) существенно не влияет на эффективность сепарирования. Это объясняется невысокой концентрацией зерновой смеси в зоне сепарирования, обусловленной незначительными удельными нагрузками на канал.

В исследованиях сепарирования крупяных культур в каскадном канале при варьировании конструктивно-установочными параметрами было отмечено положительное влияние горизонтального ввода на улучшение условий сепарирования. Горизонтальный участок в конце наклонного ската несколько затормаживает поток продукта и изменяет его направление в сторону приближения к горизонтальному. Оба этих фактора улучшают условия захвата легких примесей и выноса их из зоны сепарирования. Была установлена оптимальная длина горизонтального участка — около 10 мм. В среднем

сепарирования существенно влияют на эффективность сепарирования и устойчивость работы канала. Оптимальные размеры канала при удельной нагрузке 30 $\text{кг}/(\text{см}\cdot\text{ч})$ и расходе воздуха 110—150 $\text{м}^3/\text{ч}$ (на один каскад) находятся в диапазоне 40—45 мм. Большие размеры относятся к сепарируемым продуктам с увеличенным содержанием аэродинамически легких примесей и большей их натурой. Это свидетельствует о целесообразности конструирования каскадных колонок с регулируемыми размерами зоны сепарирования, особенно универсальных, предназначенных для

эффективности при горизонтальном вводе повышается на 3—4%, оптимальный расход воздуха сохраняется примерно в тех же пределах (910—1020 $\text{м}^3/\text{ч}$).

Сравнение данных исследований с основными показателями, полученными при производственных испытаниях последней модели четырехкаскадной аспирационной колонки А1-БКА [32], подтверждает основные выводы по технологической эффективности и целесообразности применения каскадного пневмосепарирования в процессе крупяных заводов не только на контрольных операциях, но и на разделении продуктов шелушения гречихи и проса.

Например, при содержании в сепарируемой смеси (продукты шелушения проса) несвязанной лузги 8,12% и мучки 2,64% при удельной нагрузке около 50 $\text{кг}/(\text{см}\cdot\text{ч})$ и расходе воздуха 480—500 $\text{м}^3/\text{т}$ эффективность на аспирационной колонке А1-БКА достигала: по лузге до 99,5% и мучке до 92,5%, что даже несколько выше результатов, полученных при исследовании, где максимальная эффективность колебалась в пределах 98,0—98,5%.

Некоторое повышение эффективности и меньший расход воздуха примерно при одинаковой концентрации легких примесей и нагрузочных условиях объясняются меньшей натурой примесей и общей закономерностью повышения удельных показателей с увеличением единичной мощности установки.

При сепарировании гречневой крупы с содержанием лузги до 1,88% и удельной нагрузкой 38 $\text{кг}/(\text{см}\cdot\text{ч})$ эффективность колонки А1-БКА колебалась в пределах от 90 до 100% при содержании полезного продукта в отходах $a < 1,0\%$; при очистке зерна гречихи от легких примесей средние данные эффективности составили 83—88%.

Для сравнительной оценки пневмосепарирования продуктов шелушения крупяных культур в каскадном и прямоугольном канале с вертикальным воздушным потоком было проведено несколько серий опытов на вертикальном канале с горизонтальным вводом ($B=160$ мм, $H_1=1000$, $H_2=240$ и $L=200$ мм) при одинаковых расходах воздуха, удельных нагрузках, концентрации и физико-механических свойствах легких примесей. В процессе исследований были установлены оптимальные значения скорости воздушного потока при сепарировании продуктов шелушения гречихи $v_B=4,6-4,8$ м/с и расходе воздуха 540—550 $\text{м}^3/\text{ч}$, или 900—920 $\text{м}^3/\text{т}$, что примерно соответствует данным каскадного сепарирования (910—950 $\text{м}^3/\text{т}$). Эффективность сепарирования при этих условиях, нагрузке 30 $\text{кг}/(\text{см}\cdot\text{ч})$ и содержании несвязанной лузги до 15,0% устойчиво держалась на уровне не менее 99% при содержании нормального зерна в отходах $a < 1,0\%$. При снижении расхода воздуха до 425 $\text{м}^3/\text{ч}$ было отмечено снижение эффективности до 84—87%. Эффективность пневмосепарирования продуктов шелушения крупяных культур в вертикальном воздушном канале при одинаковом расходе воздуха и прочих равных условиях в среднем на 4% выше, чем при каскадном сепарировании.

Каскадное пневмосепарирование продуктов шелушения крупных культур по основным показателям процесса не имеет существенных преимуществ перед традиционными устройствами с вертикальным каналом, однако каскадные пневмосепарирующие устройства отличаются меньшими габаритными размерами и конструктивно удачнее komponуются с другими технологическими машинами.

§ 3. Относоосаждающие камеры

Аэродинамически легкие примеси, выделенные из зерновой смеси, отделяются от воздушного потока в относоосаждающих устройствах. Наиболее легкая часть примесей и зерновая пыль отделяются на последующих этапах очистки воздуха, как правило, в батарейных циклонах или всасывающих матерчатых фильтрах. Имеются различные схемы компоновки относоосаждающих устройств с основными рабочими органами пневмосепарирующих машин. Чаще всего они выполнены в одном комплексе по единой технологической схеме. Некоторые пневмосепараторы не имеют относоосаждающих устройств и рассчитаны на обслуживание стандартными воздухоочистителями, которые можно устанавливать на один или группу пневмосепараторов. Сейчас большинство зарубежных фирм отказывается от установки непосредственно на машинах осадочных камер или других устройств. Например, зерновые сепараторы фирм «Ми-аг» (ФРГ), «Бюлер» (Швейцария), «Хэпт-Картер» (США) не имеют традиционных аспирационно-осадочных устройств, а аэродинамически легкие примеси осаждаются и выделяются отдельно от технологических машин. У такой компоновки есть недостатки, поскольку основную наладку воздушного режима в пневмосепарирующих устройствах производят по качественному контролю примесей, отбираемых из осадочных камер.

В большинстве случаев рациональнее выделять наиболее крупные частицы легких примесей в осадочных камерах, а окончательную очистку воздуха производить централизованным способом в эффективных пылезадерживающих устройствах, обслуживающих машины и оборудование различного назначения.

Относоосаждающие камеры. В современных пневмосепарирующих машинах для выделения легких примесей из двухфазного потока применяют в основном осадочные камеры двух разновидностей и комплекты воздухоочистителей, состоящие из инерционных жалюзийных пылеотделителей, сетчатых инерционных отделителей и циклонов [46]. В некоторых машинах применяют отдельные элементы комплектов. Следует отметить, что конструктивно и технологически осадочные камеры более просты, поэтому комплекты воздухоочистителей нашли ограниченное применение в основном в ворохоочистителях ВО-50 и некоторых зерноочистительных машинах сельскохозяйственного типа. Преимущество этих комплектов заключается в большем коэффициенте очистки воздуха, позволяющем ограничиться одноэтапной очисткой. В то же время компоновка в каждой

машине громоздких и металлоемких пылеосаждающих устройств при большом числе машин на предприятии приводит к неоправданному материальному и трудовым затратам, усложняет их эксплуатацию и увеличивает габаритные размеры производственных помещений.

Применяемые сейчас осадочные камеры выполняют либо в виде бункера с перегородкой для изменения направления воздушного потока, так называемые камеры гравитационного типа, либо в виде бункера с центральной трубой и спиральной или наклонной стенкой для схода выделенных примесей — камеры центробежного типа. По первому типу выполнены осадочные камеры у воздушно-ситовых сепараторов типа ЗСМ; по второму — у машин последней разработки (ворохоочистителей ЗВ-50, воздушных сепараторов БДА, БВЗ и других).

В камере гравитационного типа скорость воздушного потока, поступающего из пневмосепарирующего канала, уменьшается до 1,0—1,8 м/с. В результате силы тяжести, действующие на частицы, преодолевают несущую способность воздушного потока, и частицы выпадают в сборный шнек или осаждаются в нижней части камеры. Наклонная или вертикальная перегородка камеры резко меняет направление воздушного потока, и возникающие при этом силы инерции способствуют осаждению частиц. Очищают камеры через специальные люки. Шнек с противоприсосным клапаном выводит осадившиеся примеси. В некоторых машинах примеси выводят через систему лепестковых клапанов. Расход воздуха через камеру регулируют поворотным клапаном. Камеру соединяют с вентилятором через отверстие в верхней ее части.

Одно из основных требований, предъявляемое к осадочным камерам, — это герметичность, особенно для машин с замкнутым циклом воздуха. Для надежного вывода примесей и устранения сводобразований углы наклона стенок камеры должны быть не менее 60°.

Основной расчетный параметр камер такого типа — это скорость воздуха по сечению камеры в зоне осаждения примесей. Эффективного осаждения примесей достигают при скорости воздуха 1,0—1,6 м/с. Дальнейшее снижение скорости не дает существенного увеличения коэффициента осаждения, но увеличивает габаритные размеры пневмосепарирующего устройства. Коэффициент осаждения в камерах гравитационного типа колеблется в пределах 80—85%.

Более эффективны камеры центробежного типа. Принцип действия их отличен от камер гравитационного типа: воздух обтекает трубу, закручивается и поступает в продольное щелевое отверстие в нижней части трубы. Часто, особенно при длинных каналах, это отверстие выполняют расширяющимся по мере удаления от вентилятора. Этим достигают более равномерного поля скоростей воздушного потока по длине канала. Частицы под действием центробежных сил прижимаются к стенке, сходят по ней в зону понижен-

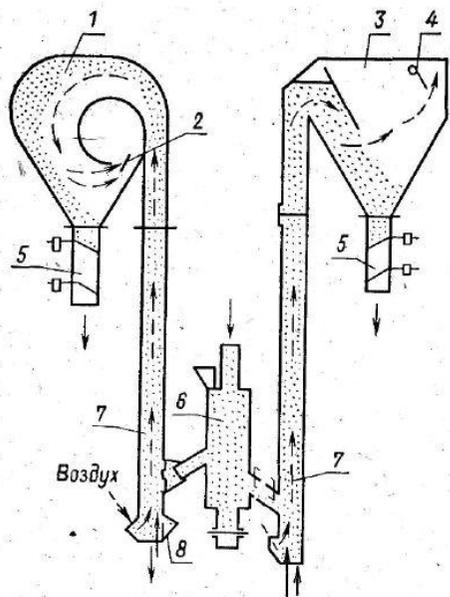


Рис. 114. Экспериментальное пневмосепарирующее устройство:

1 — камера центробежного типа; 2, 4, 8 — клапаны; 3 — камера гравитационного типа; 5 — клапанные коробки; 6 — распределительная коробка; 7 — пневмосепарирующие каналы.

Сравнительные исследования [32] камер гравитационного и центробежного типа позволили уточнить показатели их эффективности.

Работу проводили с экспериментальными камерами 1 и 3, по форме и размерам полностью соответствующими камерам воздушно-ситовых сепараторов ЗСМ-50 и ЗС-50 (рис. 114). Уменьшили только размер по длине, т. е. выделили элемент камеры, позволяющий получить вполне достоверные данные. Нагрузки и воздушные режимы камер соответствовали производственным. Эффект осаждения легких примесей в камере центробежного типа в среднем на 6% был больше и составлял в зависимости от природы примесей от 91 до 99%; при этом в камеру центробежного типа, как и на реальных машинах, поступало воздуха на 25% больше, что только подтверждает большую эффективность камер центробежного типа.

Максимальное сечение центробежной камеры l_s (рис. 115) определяют, исходя из расчета уменьшения скорости воздушного потока до 1,2—1,6 м/с. Профиль криволинейной части стенки для большинства центробежных камер отечественных и зарубежных машин на участке ab приближается к логарифмической спирали, которую строят в соответствии с зависимостью $\rho = \rho_0 l^{k\varphi}$ в полярных координатах. Радиус кривизны определяют по формуле

$$r = \rho \sqrt{1 + k^2} \quad (479)$$

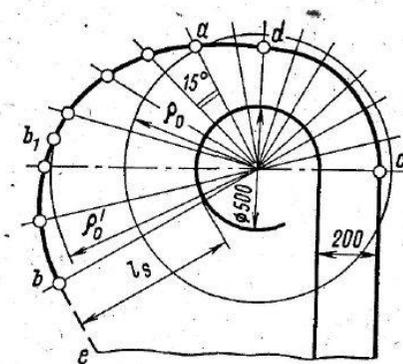


Рис. 115. Профиль осадочной камеры ворохоочистителя ЗВ-50.

ных скоростей и под действием сил тяжести выпадают в приемное устройство шнека.

Конструкторы пневмосепарирующих машин отдают предпочтение камерам центробежного типа, однако обоснованных данных, подтверждающих большую эффективность этих камер, нет [46].

На рисунке 115 приведен профиль осадочной камеры ворохоочистителя ЗВ-50. Участок cd выполнен по дуге окружности, концентричной центральной трубе, короткий участок da — прямолинейный, участок ab — спрофилирован по кривой, приближающейся к логарифмической спирали. Причем криволинейная часть стенки, разделенная на два участка ab_1 и b_1b , достаточно точно описывается уравнениями двух сопряженных логарифмических спиралей с показателем k , равным соответственно 0,6 и 0,1, и ρ_0 , равным 52 и 82 см. Нижняя часть стенки be выполнена прямолинейной с углом наклона к вертикали около 50° . Эффективность осаждения примесей в рассматриваемой камере по результатам экспериментов колеблется в зависимости от количественно-качественных характеристик примесей в пределах 96—99%, что свидетельствует о вполне удовлетворительной работе относосаждающих устройств ворохоочистителей и сепараторов с центробежными камерами.

§ 4. Герметизирующие устройства

Герметизирующие устройства в пневмосепарирующих машинах предназначены для вывода отсепарированных материалов без нарушения воздушного режима. Наиболее распространены шлюзовые затворы барабанного типа. В машинах, где разрежение воздуха в камерах не так велико (воздушно-ситовые сепараторы, воздушные сепараторы и аспирационные колонки), применяют клапанные герметизирующие устройства различных модификаций, основные преимущества которых состоят в простоте конструкции и в том, что нет приводных устройств.

Шлюзовые затворы. В таблице 28 приведена характеристика шлюзовых затворов, применяемых в современных пневмосепарирующих машинах и пневмотранспортных установках. Чаще других используют шлюзовые затворы емкостью 6 и 15 л.

Сейчас осваивают новую серию более совершенных шлюзовых затворов.

Ротор шлюзового затвора устанавливают в корпусе по одной из посадок движения — скользящей или ходовой, по второму или тре-

Таблица 28. Техническая характеристика шлюзовых затворов

Марка	Емкость, л	Частота вращения ротора, об/мин	Габаритные размеры, мм			Масса, кг
			длина	ширина	высота	
Ш-200	200	15,7	1492	860	1055	1600
Ш-110	110	16	1100	950	900	1460
Ш-20	20	10	885	745	632	333
Ш-15, Шу-15	15	15—30	490	420	420	120—130
Ш-6, Шу-6	6	15—30	440	300	300	50—73
Ш-3	3	22	308	265	254	38

тъему классу, в зависимости от требуемой степени точности, определяемой, в свою очередь, разностью давлений.

Особенно большие требования предъявляют к шлюзовым затворам, работающим в высоковакуумных пневмотранспортных установках.

Даже при сравнительно хорошей подготовке сопряженных частей затвора через ячейки вращающегося ротора перетекает воздух.

Попытки конструкторов создать герметичные шлюзовые затворы применением различных сменных эластичных накладок на лопасти ротора, установкой валов ротора на подвижных опорах, обеспечивающих регулируемый прижим ротора к верхней части корпуса по мере износа деталей, не дали положительных результатов. Некоторое улучшение плотности соединения привело к усложнению конструкции и эксплуатации.

Плотность соединения затвора в большей степени определяется точностью и качеством изготовления и сборки. В случае особо высоких требований ротор притирают к корпусу с применением смазок, в которые добавляют абразивный материал.

Подсос воздуха через шлюзовой затвор в зависимости от количества воздуха, перемещаемого через зашлюзованный узел, степени разрежения воздуха над затвором, специальных требований, например повышенной герметичности и т. д., не должен превышать 2—3%.

Основные недостатки шлюзовых затворов состоят в том, что они измельчают транспортируемые продукты в зазорах между ротором и корпусом, и в возможном заклинивании ротора в корпусе.

Установка упругих накладок на лопасти ротора предохранительных резиновых валиков и отражательных перегородок в корпусе уменьшает измельчение продукта и вероятность заклинивания ротора, но появляется необходимость периодической смены деталей. В практике эксплуатации шлюзовых затворов это решение не получило большого распространения.

Привод шлюзовых затворов, как правило, групповой от индивидуальных электродвигателей через червячные редукторы типа РЧ, РЧН или мотор-редукторы. Выходной вал редуктора с валом ротора соединяют эластичными муфтами различных типов. В некоторых конструкциях муфт предусматривают устройства (срезающиеся вставки, шпильки, пружинные фиксаторы и т. д.) для нарушения жесткой связи с ведомым валом при заклинивании ротора в корпусе шлюзового затвора. Мощность для привода в зависимости от емкости и условий работы шлюзового затвора колеблется в пределах от 0,15 до 0,6 кВт.

При работе шлюзовых затворов с малой частотой вращения ротора (15—30 об/мин) для привода иногда применяют мальтийские механизмы. Это способствует лучшему заполнению ячеек ротора, особенно для трудносыпучих продуктов, и снижению подсоса воздуха через шлюзовой затвор.

Несмотря на ряд недостатков, шлюзовые затворы барабанного типа сейчас — наиболее простое и рациональное решение герметичного вывода различных материалов из машин, работающих под избыточным давлением или разрежением.

Производительность, или, точнее, пропускную способность, шлюзового затвора определяют по формуле

$$Q = 6 \cdot 10^{-2} Vz \gamma_{\text{п}} \psi n, \quad (480)$$

где V — объем ячейки барабана, л; z — число ячеек в барабане; $\gamma_{\text{п}}$ — натура продукта, кг/л; ψ — коэффициент заполнения ячеек; n — частота вращения ротора, об/мин.

Если принять $Vz = E$ — емкость шлюзового затвора, то

$$Q = 6 \cdot 10^{-2} E \gamma_{\text{п}} \psi n. \quad (481)$$

Коэффициент заполнения ячеек зависит от физико-механических свойств продукта и частоты вращения ротора шлюзового затвора и представляет собой отношение фактического объема продукта в ячейках $V_{\text{ф}}$ к их геометрическому объему V

$$\psi = \frac{V_{\text{ф}}}{V} = \frac{G_{\text{п}}}{V \gamma_{\text{п}}},$$

где $G_{\text{п}}$ — масса продукта в ячейке, кг.

На рисунке 116 представлены кривые зависимости [18] производительности шлюзового затвора с ротором $\varnothing 200$ мм от частоты вращения при работе на зерне пшеницы натурой 0,74 кг/л и пшеничных отрубях с $\gamma_{\text{п}} = 0,32$ кг/л. На этих же графиках приведены данные об изменении коэффициента заполнения ψ . Для зерна пшеницы максимальная производительность шлюзового затвора при $n = 88—95$ об/мин, коэффициент заполнения ψ при этом колеблется в небольших пределах — 0,57—0,53 (зона *ef*), а для пшеничных отрубей — при $n = 47—65$ об/мин и коэффициенте заполнения $\psi = 0,55—0,42$ (зона *cd*).

С увеличением частоты вращения ротора шлюзового затвора уменьшается коэффициент заполнения ячеек, однако производительность затвора увеличивается, поскольку разгрузочная способность,

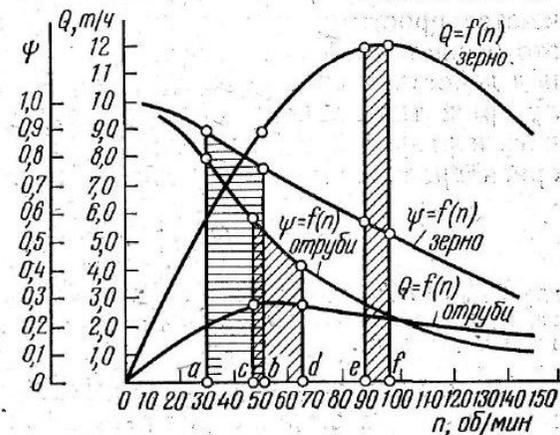


Рис. 116. Кривые зависимости производительности шлюзового затвора и коэффициента заполнения ячеек от частоты вращения ротора.

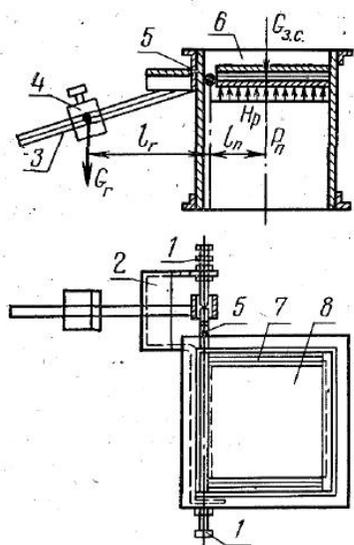


Рис. 117. Клапанное герметизирующее устройство:

1 — регулируемые центры; 2 — скоба; 3 — грузовой рычаг; 4 — груз; 5 — валик; 6 — корпус клапана; 7 — П-образная скоба; 8 — клапан.

особенно на сыпучих продуктах, увеличивается быстрее, чем уменьшается коэффициент заполнения ячеек шлюзового затвора.

Увеличению частоты вращения сопутствует увеличение подсосов через шлюзовую затвор, поэтому в практике конструирования и эксплуатации назначают частоту вращения ротора меньше оптимальной. Производительность шлюзового затвора в целом уменьшается, но зато больший ее прирост происходит в результате повышающегося коэффициента заполнения. Обычно частоту вращения ротора шлюзового затвора назначают в пределах 30—50 об/мин (зона *ab*), причем, как правило, для унификации приводов, одинаковой для зерна и продуктов его измельчения. Эти значения приближаются к оптимальным для продуктов измельчения зерна и аспирационных отходов.

Коэффициент заполнения при расчетах обычно принимают: для зерна $\psi = 0,75—0,85$; для продуктов измельчения $\psi = 0,55—0,75$. В некоторых конструкциях для вывода отходов применяют шлюзовые затворы пробкового типа. Ротор такого затвора выполнен в виде массивного цилиндра с двумя неглубокими карманами в размер приемного и выходного отверстий. Большого распространения такие затворы не получили.

Клапанное герметизирующее устройство. Эти устройства отличаются простотой конструкции и работают без заклинивания, как это бывает в шлюзовых затворах. Клапан (рис. 117) открывается под действием силы тяжести столба продукта, преодолевающей силу прижатия клапана, обусловленную моментом сил груза на рычаге и разрежением над клапаном. Высоту столба продукта $h_{с.п}$ ориентировочно можно подсчитать из выражения

$$G_{с.п} \geq \frac{G_r l_r}{l_n} + H_p F_k,$$

где $G_{с.п} = F_k h_{с.п} \gamma_n$ — масса столба продукта, кг; G_r, l_r — масса и плечо груза, м; l_n — плечо силы P_n , м; H_p — разрежение над клапаном, Н/м²; F_k — площадь клапана, м².

Было показано, что для надежной работы клапанов зерновых машин высота столба зерна должна быть в пределах 700—900 мм. Для повышения герметизации часто применяют систему из двух клапанов, однако это еще больше увеличивает габаритные размеры по высоте и потому ограничивает распространение такой системы.

Клапанные герметизирующие устройства применяют в конструкциях относосаждающих камер для вывода аспирационных отходов. Такой вывод продукта из относосаждающих камер конструктивно прост и достаточно надежен. Однако то, что продукт выводится по всей длине камеры, бывает не всегда удобным, особенно для высокопроизводительных сепараторов с большой длиной камер. В этом случае обычно применяют шнек с противоприсосным клапаном в его конце. Клапан выполнен из листового металла и свободно подвешен на эластичной резине к торцовой стенке шнека. При разрежении в камере клапан присасывается, перекрывая выходное отверстие шнека. Усилие прижатия преодолевается массой отходов и в большой степени подпрессовкой их шнеком.

Такой способ герметизации вывода отходов применяют в высокопроизводительных сепараторах типа ЗСМ, ворохоочистителях ЗВ-50 и в ряде других машин как конструктивно простой и достаточно надежный.

Глава 13. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ СИТ

В зависимости от способа очистки сит очистительные устройства подразделяют на три группы: выталкивающие застрявшие частицы из отверстий очистителями, прижатыми к сити и перемещающимися относительно их, освобождающие застрявшую частицу ударом о сито и частицу и устройства, сочетающие оба принципа.

По способу передвижения различают устройства с принудительным движением и инерционные. В устройствах первого типа очистители приводятся электродвигателем или от главного вала машины через цепные, ременные или зубчатые передачи. Относительное перемещение инерционного механизма обусловлено силами инерции, вызванными движением ситового корпуса.

В зависимости от материала устройства первой группы могут быть с резиновыми очистителями и волосяными щетками плоской или цилиндрической формы.

К инерционным механизмам ударного действия относят резиновые шарики и шайбы различных модификаций. Резиновыми шариками очищают штампованные, тканые металлические, тканые шелковые и капроновые сита зерноочистительных и просеивающих машин с круговым поступательным и поступательно-возвратным движением корпуса, шайбами очищают тканые сита просеивающих машин с круговым поступательным движением корпуса. В зерноочистительных и просеивающих машинах, предназначенных для элеваторов и мукомольных заводов, применяют инерционные механизмы для очистки сит.

Устройства с комбинированным воздействием на застрявшие частицы представляют собой шайбы с пучками волос. Их относят к устройствам инерционного действия и применяют главным образом для очистки тканых шелковых и капроновых сит просеивающих

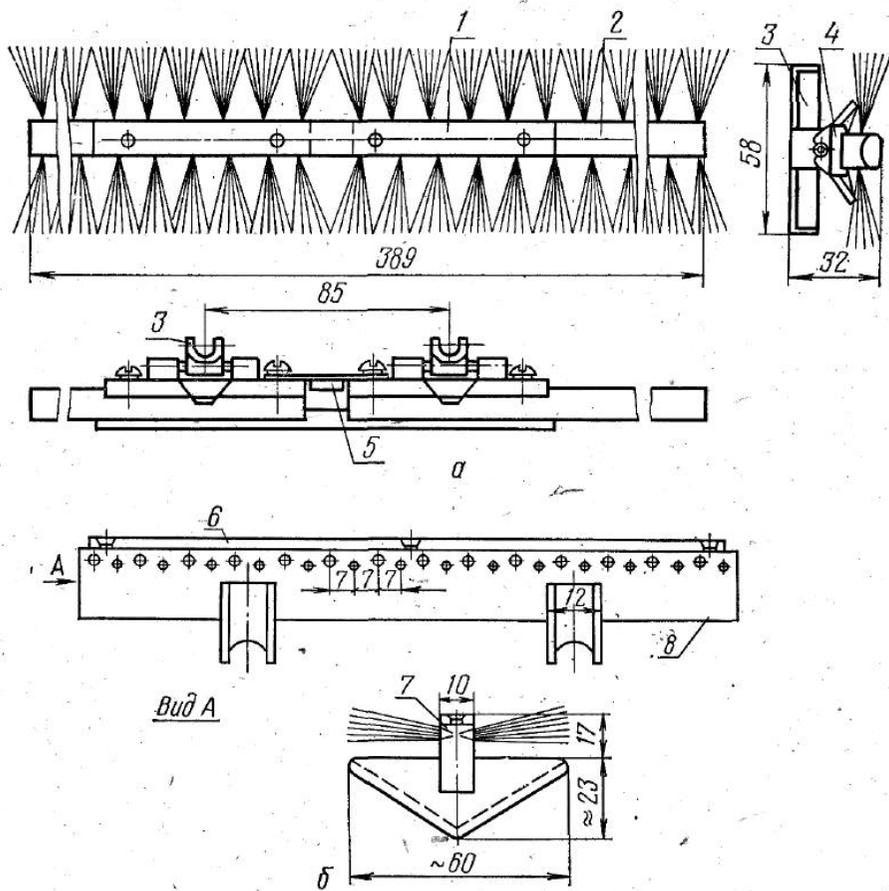


Рис. 118. Инерционные щетки:

a — ситовоечной машины швейцарской фирмы «Бюлер»; *б* — ситовоечной машины венгерского объединения «Комплекс»; 1 — деревянный брусок; 2 — щетка; 3 — ползун; 4 — коромысло; 5 — переключатель; 6 — металлическая планка; 7 — направляющее устройство; 8 — корпус щетки.

машин с круговым поступательным движением корпуса. В отличие от устройств с принудительным приводом они не нуждаются в приводном механизме, позволяют обеспечить очистку нескольких сит независимо друг от друга при различных углах наклона к горизонту и герметизировать ситовые рамы. Конструкция инерционных устройств отличается простотой, небольшой металлоемкостью.

Устройства с принудительным приводом, как и инерционные механизмы для очистки сит сепараторов, подробно изложены в соответствующей литературе и в данной книге не рассматриваются.

Металлотканые, шелковые и капроновые сита ситовоечных машин очищают инерционными щетками. На ситовоечных машинах типа ЗМС применяют инерционные щетки с односторонним движением. Они состоят из деревянной колодки, на которой набраны пучки волоса, наклоненного под углом 40° к плоскости колодки. Щет-

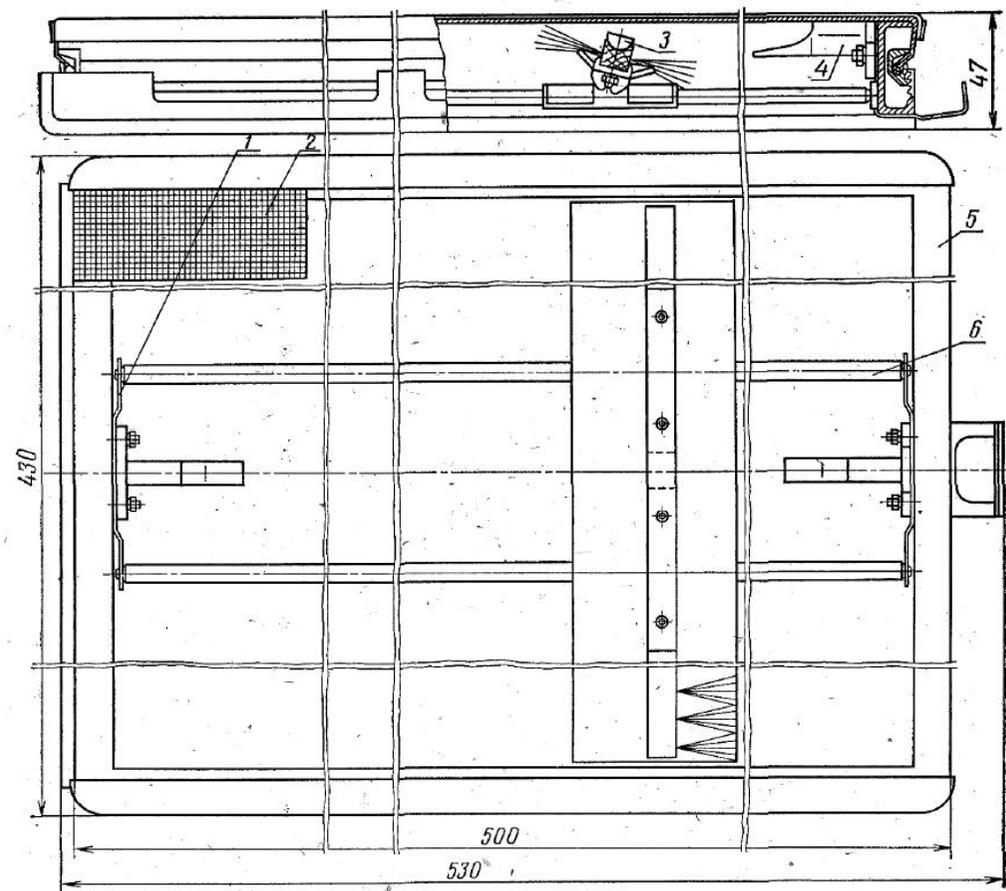


Рис. 119. Ситовая рама с инерционной щеткой:

1 — прижим; 2 — сито; 3 — щетка; 4 — упор; 5 — каркас рамы; 6 — направляющая.

ка в ситовой раме под действием сил инерции перемещается плоской частью по перфорированному днищу сита (фордону) только в одном направлении по замкнутой криволинейной траектории [50].

В отечественных ситовоечных машинах типа БСО и машинах венгерского объединения «Комплекс» для очистки сит применяют инерционные щетки, совершающие прямолинейное поступательно-возвратное движение под ситом (рис. 118, *a, б*). В рабочем положении щетка наклонена по отношению к ситу (рис. 119). Когда щетка доходит до конца сита, переключатель 5 (см. рис. 118), перемещаясь по криволинейной части упора 4 (см. рис. 119), поворачивает щетку на некоторый угол в обратную сторону. В результате щетка начинает перемещаться в противоположном направлении.

В зерноочистительных и сепарирующих машинах распространены рабочие органы с круговым поступательным движением. Сита этих машин очищают устройствами инерционного типа: блуждающими (рис. 120, *a*) по перфорированному днищу (резиновые шари-

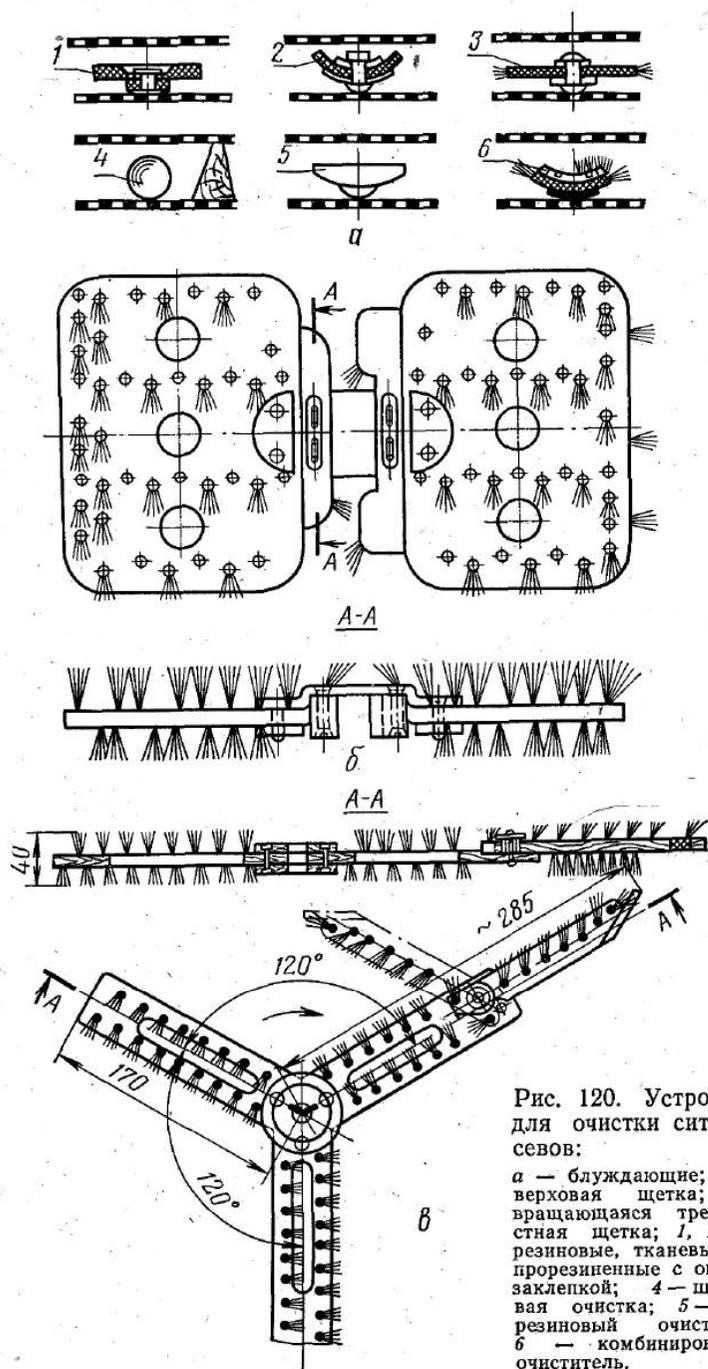


Рис. 120. Устройства для очистки сит рас-
сеев:
а — блуждающие; б —
верховая щетка; а —
вращающаяся трехло-
пастная щетка; 1, 2, 3 —
резиновые, тканевые или
прорезиненные с опорной
заклепкой; 4 — шарико-
вая очистка; 5 — литой
резиновый очиститель;
6 — комбинированный
очиститель.

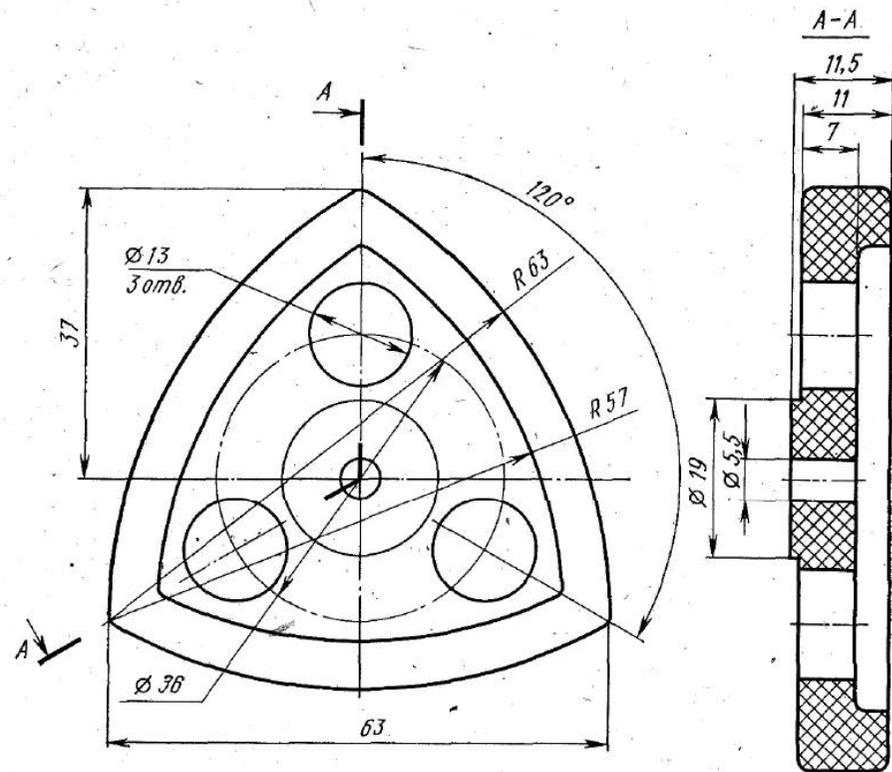


Рис. 121. Очиститель блуждающего типа.

ки, пластины, шайбы различной формы и другие); перемещающи-
мися вокруг вертикальной оси (рис. 120,в).

Резиновые шарики применяют в мельничных сепараторах с кру-
говым поступательным движением, в зерноочистительных рассевах
фирмы «Сокам», сепараторах фирмы «Бюлер» и других. Конструк-
тивное решение такого способа очистки чрезвычайно простое. Ра-
бочую ситовую раму разделяют на несколько отсеков размерами
приблизительно 150×150 мм и в каждый отсек закладывают по
3—4 шарика $\varnothing 30$ — 36 мм при высоте рамы 40—45 мм. Фордон для
шариков выполняют штампованным либо плетеным из проволочной
сетки с крупными ячейками.

Очистку шайбами конструктивно решают аналогично. Для ин-
тенсивного воздействия на сито иногда шайбы дополняют щеточной
частью б (см. рис. 120,а).

На рисунке 121 представлен очиститель блуждающего типа,
применяемый на сепараторе для фракционирования зерна БСФ-50.
Колодка очистителя изготовлена литьевым способом из термопла-
стичного полиуретана ТПУ-2М ТУ 6-05-221-397—77.

Принцип действия очистителей блуждающего типа заключается
в периодическом контакте их с ситом. Сита встряхиваются и очи-

щаются в результате многократных упругих ударов очистителя о ткань. В шайбах с щеточной частью достигается комбинированное воздействие очистителя на ситовую ткань, так как, кроме удара, периодически прикладывается сила трения щеточной части шайбы на ткань. Двигутся очистители в результате действия сил инерции рабочих органов [50].

Большинство очистителей выполняют в виде квадратных или прямоугольных пластин из резиновых, прорезиненных или тканевых материалов толщиной 4—6 мм. В центре устанавливают заклепку с увеличенной головкой. Очистители 1, 2, 3 распространены на рассевах фирм «Бюлер», «Генри Саймон», «Окрим» и других.

В современных конструкциях машин с круговым поступательным движением, выпускаемых отечественными заводами, устанавливают три вида очистителей: литой резиновый очиститель с куполообразной нижней частью 5 — рассевы типа ЗРЛ; верхние рассевные щетки, перемещающиеся по замкнутой направляющей (см. рис. 120, б), — рассевы типа ЗРМ; вращающиеся трехлопастные щетки с откидным хвостиком (см. рис. 120, в) — рассевы типа ЗРШ. Щетки трехлопастной и рамочной конструкции применяют на рассевах «Нагема».

Для очистки штампованных сит в некоторых машинах используют механизмы ударного действия в виде пружинных ударников и молоточков. При движении ситового корпуса молоточки попеременно ударяют по поверхности сит с частотой, равной частоте колебаний корпуса. Сила удара зависит от упругости пружины и угла размаха молоточков [50]. В калибровщике семян кукурузы КСК-1 очистители, кроме ударных движений по сит, перемещаются относительно его специальным механизмом, довольно сложным и трудоемким в изготовлении и эксплуатации.

Ударные механизмы менее эффективны, чем перемещающиеся относительно сита, поэтому не нашли распространения и применяют их в основном для очистки сит, отделяющих крупные примеси, и то в очень ограниченной номенклатуре машин.

§ 1. Теория и расчет вращающихся инерционных щеток

Вращающиеся инерционные щетки в отечественных и зарубежных конструкциях представлены модификациями: трехлопастные и рамочные. Кинематика и динамика этих щеток рассмотрена на примере трехлопастной щетки рассевов типа ЗРШ [22].

Строго математически описать закон вращения щетки в ситовом канале в связи с влиянием большого числа факторов (силы трения верхних и нижних пучков о ситовую ткань и поддон, состояние сита, его натяжение и другие) трудно. Поэтому движение щетки рассмотрено как относительное, без ограничения кинематической парой, и как вращательное относительно цапфы — оси ситового канала.

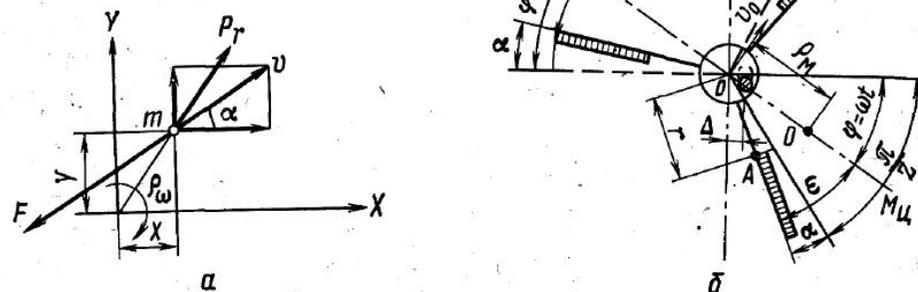


Рис. 122. К расчету вращающихся инерционных щеток

а — расчетная схема перемещения инерционной щетки в относительном движении; б — расчетная схема вращения щетки относительно оси ситового канала.

В относительном движении щетку рассматривают как материальную точку массой m , нагруженную инерционными силами, движение ее не ограничивается кинематической парой (ось — втулка с большим зазором).

Движение щетки массой m (рис. 122, а) рассматривается в системе координат XU , которая жестко связана с колеблющимся ситом.

Движение сита в этом случае — переносное, а система XU — подвижная система отсчета.

Уравнения относительного движения

$$mx = -F_x + P_r \sin \omega t; \quad (482)$$

$$my = -F_y + P_r \cos \omega t,$$

где ω — угловая скорость сита; R — амплитуда круговых колебаний сита; $P_r = m\omega^2 R$ — сила инерции в переносном движении; F — сила трения, направленная противоположно относительно скорости.

С учетом

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}; \quad F_x = F \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}; \quad F_y = F \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}.$$

Запишем уравнения так:

$$\ddot{x} = \omega^2 R \sin \omega t - \frac{F}{m} \cdot \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}};$$

$$\ddot{y} = \omega^2 R \cos \omega t - \frac{F}{m} \cdot \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$$

Частные решения этих уравнений следующие:

$$x = \rho \cos(\omega t + \varepsilon),$$

$$y = \rho \sin(\omega t + \varepsilon).$$

Продифференцировав дважды полученные уравнения и подставив в предыдущие \ddot{x} и \ddot{y} , получим тождественность равенств при

$$\rho = R \sqrt{1 - \left(\frac{F}{\omega^2 R m}\right)^2}.$$

Тогда окончательное решение уравнений будет

$$\left. \begin{aligned} x &= R \sqrt{1 - \left(\frac{F}{\omega^2 R m}\right)^2} \cos\left(\omega t + \delta + \frac{\pi}{2}\right); \\ y &= R \sqrt{1 - \left(\frac{F}{\omega^2 R m}\right)^2} \sin\left(\omega t + \delta + \frac{\pi}{2}\right); \end{aligned} \right\} (483)$$

Таким образом, если нет ограничений со стороны цапфы, траекторией центра тяжести щетки в относительном движении можно считать окружность радиуса ρ . Центр тяжести щетки будет двигаться по этой окружности синхронно ситовому каналу со сдвигом фаз $\delta + \frac{\pi}{2}$.

При зазоре в кинематической паре (втулка — ось) Δ радиус ρ не может быть больше

$$\Delta = \frac{D - d}{2},$$

где D — диаметр отверстия щетки; d — диаметр цапфы.

Следовательно, $\omega_{кр}$, при котором ρ достигает величины Δ , определится их равенством, и тогда

$$\Delta = R \sqrt{1 - \left(\frac{F}{\omega^2 R m}\right)^2} \text{ и } \omega_{кр} = \sqrt{\frac{F}{m \sqrt{R^2 - \Delta^2}}}$$

При вращении щетки относительно оси ситового канала рассмотрен случай непрерывного контакта втулки с осью (рис. 122,б). Перемещение щетки возможно только тогда, когда в каждое мгновение проекции векторов относительно скоростей пучков волоса по плоскости наклона их осей направлены вперед. Сопротивление пучков волоса при упоре в ситовую ткань неограниченно велико по сравнению с их сопротивлением перемещению в обратном направлении. Иными словами, щетка движется по направлению ориентации пучков.

Движение щетки рассмотрено как поворот вокруг центра мгновенного вращения O (см. рис. 122,б), расположенного на пересечении продолжения линии центров втулки щетки и оси (линия $M_{ц}$) и перпендикуляра, восстановленного к оси лопасти из точки A , соответствующей ближнему к оси щетки пучку.

В расчетной схеме (см. рис. 122,б) введены следующие обозначения:

$\varphi = \omega t$ — фазовый угол ситового канала; α — угол поворота щетки; ε — угол между лопастью щетки и линией мгновенных центров; r — расстояние от центра O' до первого пучка волос; ρ_m — расстояние от центра щетки O' до центра мгновенного вращения O ; z — число лопастей.

$$\text{Из треугольника } AO'O \text{ } \rho_m = \frac{r}{\cos \varepsilon}.$$

Угловую скорость щетки можно выразить как

$$\omega_{щ} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{v_{щ}}{\rho_m}$$

или с учетом ранее сказанного $v_{щ} = \omega \rho = \omega \Delta$;

$$\omega_{щ} = \frac{\omega \Delta}{\rho_m} = \frac{\omega \Delta}{r} \cos \varepsilon = \frac{d\varphi}{dt} \frac{\Delta}{r} \cos \varepsilon.$$

Из рисунка $\alpha = \varphi + \varepsilon - \frac{\pi}{z}$. Продифференцировав это выражение, получим

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega_{щ} = \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

Приравняем $\omega_{щ}$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \left(\frac{\Delta}{r} \cos \varepsilon - 1 \right)$$

или

$$d\varphi = \frac{d\varepsilon}{\frac{\Delta}{r} \cos \varepsilon - 1}.$$

Чтобы исключить ε в выражении для угла α , определим, при каком изменении угла α от 0 до φ_1 угол ε изменится от $\frac{\pi}{z}$ до 0. Проинтегрировав выражение, получим

$$\int_{\frac{\pi}{z}}^0 \frac{d\varepsilon}{\frac{\Delta}{r} \cos \varepsilon - 1} = \varphi_1.$$

За это время угол α изменится от 0 до α_1 , и тогда можно записать $\alpha_1 = \varphi_1 - \frac{\pi}{z}$ из ранее выведенного соотношения углов

$$\alpha_1 = \omega t_1 - \frac{\pi}{z}; \quad t_1 = \frac{\alpha_1 - \frac{\pi}{z}}{\omega}.$$

Обозначив через T время одного оборота щетки, запишем

$$\frac{T}{t_1} = \frac{2\pi}{\alpha_1}; \quad T = \frac{t_1 \cdot 2\pi}{\alpha_1}.$$

И окончательно

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \left(1 + \frac{\pi}{z\alpha} \right). \quad (484)$$

Формула для расчета времени цикла движения щетки получена при допущении, что мгновенный центр вращения определяется положением первого пучка волос от центра масс щетки. Непрерывность контакта втулки с осью обеспечивается при $\omega \geq \omega_{кр}$.

При $\omega < \omega_{кр}$ в выражение для определения $\omega_{щ}$ вместо Δ нужно подставлять значение радиуса траектории центра масс щетки в относительном движении

$$\rho = R \sqrt{1 - \left(\frac{F}{\omega^2 R m} \right)^2}.$$

В результате обработки опытных данных ВНИИЗ получена эмпирическая зависимость времени цикла движения щетки от кинематических параметров, нагрузки и зазора в кинематической паре.

$$T = \frac{6808 + 577Q}{\Delta^{0,7} (\omega^2 R)^{2,02}}$$

где Q — нагрузка на сито, кг/мин; Δ — зазор в кинематической паре, мм; $\omega^2 R$ — ускорение сита, м/с².

§ 2. Влияние различных факторов на забиваемость сит

Эффективность работы очистителя достаточно полно характеризуется коэффициентом просвета $K_{п}$ очищаемого сита, представляющим собой отношение фактической величины просвета сита, наблюдаемой в процессе просеивания, к номинальному значению просвета. От величины $K_{п}$ зависит производительность сита, т. е. максимальное количество продукта, которое можно подать на сито в единицу времени при заданном извлечении проходовой фракции. Коэффициент просвета практически определяют по соотношению

$$K_{п} = \frac{\sum l_{\phi}}{nl},$$

где l_{ϕ} — длина части отверстия, свободной от застрявших частиц, мм; n — число отверстий в сите; l — номинальная длина отверстия, мм.

Кривые зависимости коэффициента извлечения мелких примесей ϵ от коэффициента просвета сита $K_{п}$ при различной удельной нагрузке q для зерна влажностью 12,1%, натурой 812 г/л и содержанием мелких примесей (проход сита с отверстиями размером $1,7 \times 20$ мм) 1,46% графически представлены на рисунке 123 [50]. При анализе полученных зависимостей было показано, что при увеличении удельных зерновых нагрузок уменьшение просвета сита резко снижает извлечение проходových фракций.

Практически невозможно обеспечить идеальную очистку сит. Уменьшение просвета сита на 10% при первоначальном значении $K_{п} = 0,96 - 1,00$, вызывающее уменьшение извлечения проходовой фракции не более чем на 10%, следует считать допустимым. Поэтому для эффективного сортирования зерновой смеси необходимо обеспечить бесперебойную работу очистителей, чтобы они поддерживали значение $K_{п} \geq 0,9$.

Результаты определения коэффициента просвета $K_{п}$ в зависимости от изменения содержания мелких примесей (проход сита с отверстиями размером $1,7 \times 20$ мм) и удельных нагрузок для твердой пшеницы влажностью 12%, натурой 814 г/л графически представлены на рисунке 124,а.

Опыты проводили в производственных условиях на сепараторе ЗСМ-50 первого элеваторного прохода. Подсевные сита очищались плоскими резиновыми очистителями (резина 122-6). Скорости перемещения инерционных механизмов находились в пределах 0,20—0,25 м/с, усилие поджатия каждой очистительной пластины к ситам составляло 8 Н.

Кривые изменения коэффициента просвета в зависимости от толщины сита графически представлены на рисунке 124,б для удельной нагрузки $q = 50$ кг/(см·ч). Из графика видно, что с увеличением толщины полотна отверстия сита забиваются быстрее. Уменьшается просвет сита на 10% для всех испытываемых полотен практически за одно и то же время от начала сортирования (в пределах 25—30 с).

Как показали опыты, резиновый очиститель, прижатый к ситам с силой 7—8 Н и перемещающийся относительно него со скоростью 0,05—0,20 м/с, обеспечивает высококачественную очистку сита ($K_{п} = 0,81 - 0,92$).

Из графика значений коэффициента просвета при различных ускорениях сита, соответствующих 390, 475, 550 и 610 кол/мин (рис. 124,в), видно, что при выключенном очистительном устройстве быстрее уменьшается просвет подсевного сита при ускорении $a = 10$ м/с². Медленнее уменьшается просвет при $a = 25$ м/с².

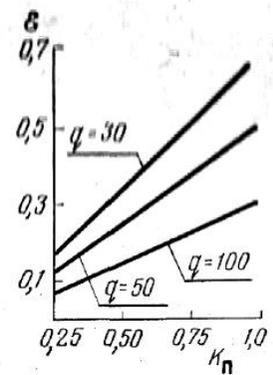


Рис. 123. Кривые влияния $K_{п}$ подсевного сита на коэффициент извлечения ϵ при различной удельной нагрузке q , кг/(см·ч).

Опыт внедрения новых сепарирующих машин на зерноперерабатывающих предприятиях показал, что повышение четкости разделения зерновых смесей на всех этапах технологического процесса от очистки зерна при приемке до контроля готовой продукции позволяет повысить общий выход и качество продукции, снизить ее себестоимость и улучшить технико-экономические показатели предприятия в целом. Однако замена отдельной машины более производительной и эффективной может и не повлиять существенно на повышение показателей предприятия, если это не сопровождается целесообразным изменением технологического процесса на смежных операциях, а иногда и изменением общей технологической схемы процесса. Это объясняется тем, что технологическая схема и режим работы остальных машин и транспортных средств приспосабливались к старой машине с присущими ей недостатками как на стадии разработки технической документации предприятия, так и в процессе длительной эксплуатации.

Наиболее распространенный прием компенсации недостаточной эффективности зерноочистительных сепараторов — это последовательный пропуск зерновой смеси через несколько машин одинакового принципа действия, чаще всего одной и той же модели.

В Правилах организации и ведения технологического процесса на крупных предприятиях предусмотрено двукратное отделение лузги и мучки из продуктов шелушения в пневмосепараторах с замкнутым циклом воздуха. Недосевы мелких компонентов в сходовых продуктах мельничных рассевов побуждают технологов вводить дополнительные операции сортирования и изменять режим работы ситовечных машин и т. д. Локальное улучшение сепарирования на отдельной операции без изменения режимов других технологических машин не позволяет реализовать все преимущества вновь введенной машины, а иногда и вступает в противоречие с привычными технологическими приемами и транспортными коммуникациями.

Поэтому одно из важных направлений технического прогресса на зерноперерабатывающих предприятиях — это комплексное совершенствование технологических процессов на основе внедрения новых сепарирующих машин. Правильность этого положения подтверждается результатами массового внедрения шкафных мельничных рассевов ЗРШ-4М и ЗРШ-6М, сопровождавшегося перераспределением площади сит между группами систем; изменением режимов измельчения в вальцовых станках, а также качественного и количественного состава промежуточных и готовых продуктов с изменением технологической схемы размольных отделений мукомольных заводов. Примеры комплексного решения задач сепарирова-

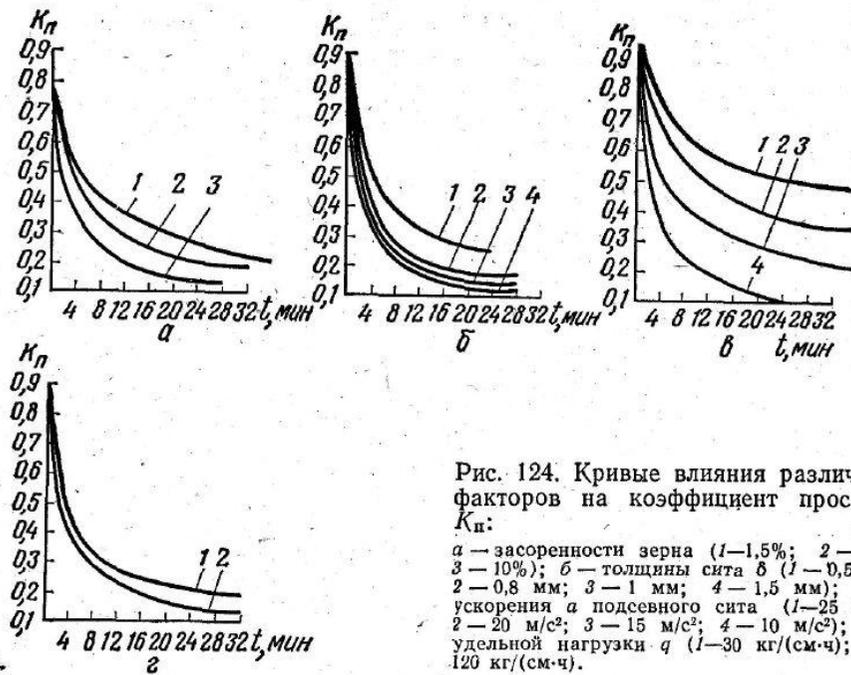


Рис. 124. Кривые влияния различных факторов на коэффициент просвета K_n :
а — засоренности зерна (1—1,5%; 2—5%; 3—10%); б — толщины сита δ (1—0,5 мм; 2—0,8 мм; 3—1 мм; 4—1,5 мм); в — ускорения a подсевного сита (1—25 м/с²; 2—20 м/с²; 3—15 м/с²; 4—10 м/с²); г — удельной нагрузки q (1—30 кг/(см·ч); 2—120 кг/(см·ч)).

При работающем очистительном устройстве фактические коэффициенты просвета при ускорениях $a=15, 20, 25$ м/с² близки по своему значению ($K_n=0,88-0,98$).

Из графика (рис. 124,г) видно, что величина коэффициента просвета при постоянных параметрах ситового корпуса (с выключенным очистительным устройством) и постоянном качестве зерна изменяется почти одинаково для всех зерновых нагрузок в пределах от 30 до 120 кг/(см·ч). При работающем очистительном устройстве просвет сита поддерживается в пределах 88—93% также практически независимо от величины зерновой нагрузки.

Результаты опытов по определению коэффициента просвета подсевного сита при работе с зерном различного качества в основном по-влажности приведены в таблице 29.

Таблица 29. Значение K_n при различной влажности зерна

Качество зерна				K_n
натура, г/л	влажность, %	содержание сорной примеси, %	содержание зерновой примеси, %	
780—786	12,8—13,8	1,30—1,68	3,0—4,1	0,85—0,92
770—795	23,3—23,7	2,30—3,00	4,0—5,2	0,68—0,72

ния — это описанные в главе 10 линии очистки зерна с поэтапным фракционированием на мукомольных заводах; реконструкция Ефремовского крупяного завода при внедрении новых шкафных рассевов А1-БРК, позволившая на 15% повысить производительность предприятия, на 2,0—2,5% увеличить выход крупы при одновременном повышении ее качества в результате уменьшения в ней количества дробленки.

Дальнейшее развитие этого направления нуждается в решении ряда научных и технических задач, важнейшие из которых следующие.

1. Изучение свойств компонентов разных зерновых смесей для выявления новых признаков различия частиц и их корреляционных связей с технологическими свойствами и качественными показателями готовых продуктов. К числу малоизученных свойств относят ударные (коэффициенты восстановления нормальной скорости и коэффициенты ударного трения), электрические, оптические и другие физические свойства, а также свойства, комплексно проявляющиеся при пневматической и вибропневматической сепарации.

2. Обоснование и реализация методов повышения интенсивности известных процессов путем применения поля центробежных сил, наложения высокочастотных колебаний и т. д.

Первый метод получил научное обоснование в работах Н. Е. Авдеева [2], а метод с наложением вибраций — в работах Е. С. Гончарова [25]. Возможность увеличения эффекта ситового и фрикционного сепарирования благодаря наличию поля центробежных сил была очевидна давно, однако для сыпучих (в частности, зерновых) смесей реализация этого метода встречает трудности технического характера (интенсивный износ рабочих органов, травмирование зерна в центробежно-вибрационных сепараторах и т. д.

Наложение высокочастотных колебаний — это способ ослабления фрикционных связей как с рабочими органами, так и между частицами, что благоприятствует увеличению их подвижности при ситовом сепарировании, при использовании эффекта самосортирования и в других случаях.

3. Разработка и внедрение принципиально новых способов сепарирования на основе не использованных для этого ранее, но известных физических и механических эффектов.

К числу таких эффектов относится, например, гироскопический, возникающий при закручивании частиц вихревыми потоками воздуха для ориентирования, чтобы использовать различия в геометрии масс.

Другим примером может служить воздействие электрического поля на смесь, предварительно подвергнутую электризации трением, в результате чего частицы двух компонентов получают электрические заряды различной величины и полярности. Такое различие можно использовать для движения частиц разделяемых компонентов в разных направлениях для вывода их.

4. Разработка критериев оценки технико-экономической эффективности работы сепарирующих машин.

Критерии должны отражать влияние качества сепарирования (коэффициентов извлечения компонентов, однородности фракций) на результаты производственного процесса в целом, степень использования сырья, качество и выход готового продукта, удельную энергоемкость и т. д. Знание таких критериев открывает перспективы оптимизации условий и параметров процесса сепарирования в меру его влияния на работу предприятия.

5. Разработка методов и технических средств контроля за процессами сепарирования.

То, что нет необходимых приборов и единых методов для определения степени засоренности при приемке зерна на элеваторы и склады, вызывает непроизводительные материальные затраты, а также лишает результаты этой работы необходимой объективности.

6. Развитие технологических схем сепарирования в производственном процессе предприятия и в отдельных сепарирующих машинах.

Наиболее общим и перспективным представляется способ, при котором в процессе очистки на высокопроизводительных машинах из исходной смеси извлекают большую часть зерна необходимых кондиций, не ограничивая количества зерна в отходах. На втором этапе при помощи машин, разделяющих поток по другим признакам отличия компонентов, извлекают кондиционное зерно из отходов.

Машины «вторичной» обработки могут иметь меньшую производительность, но должны обеспечивать очень высокую четкость сепарирования; по принципу действия обычно они отличаются от машин «первичной» обработки.

Применить такой двухстадийный процесс сепарирования в одной машине не всегда возможно и целесообразно.

1. Авдеев Н. Е. К исследованию центробежных сепараторов зерновых смесей. — Доклады ВАСХНИЛ, 1973, № 2.
2. Авдеев Н. Е. Центробежные сепараторы для зерна. — М.: Колос, 1975.
3. Артоболевский И. И. Теория механизмов. — М.: Наука, 1965.
4. Бакал С. С. Новое в технологии крупяного производства. — М.: Высшая школа, 1965.
5. Борискин М. А., Демский А. Б., Крюков Е. П. Механизмы очистки сит зерноочистительных и просеивающих машин. — М.: ЦИТИ Министерства заготовок СССР, 1969.
6. Богомоллов М. Н. Влияние толщины сыпучего тела на эффективность просеивания. — Труды ВНИИЗ, 1963, вып. 49.
7. Богомоллов М. Н., Гортинский В. В. Влияние удара просеиваемых частиц о кромки отверстия сита на эффективность сепарирования. — «Труды ВНИИЗ», 1963, вып. 46.
8. Блехман И. И., Хайнман В. Я. О теории вибрационного разделения сыпучих смесей. — «Известия АН СССР. Механика», 1965, № 5.
9. Блехман И. И., Гортинский В. В., Птушкина Г. Е. Движение частицы в колеблющейся среде при наличии сопротивления типа сухого трения. — «Известия АН СССР. Механика и машиностроение», 1963, № 4.
10. Блехман И. И., Джанелидзе Г. Ю. Вибрационное перемещение. — М.: Наука, 1964.
11. Варламов Р. Г. Основы художественного конструирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Советское радио, 1967.
12. Гальперин Г. Д., Костюк Г. Ф. О производительности шлюзового затвора. — Сб. статей «Исследование и конструирование технологического оборудования», ОТИ им. М. В. Ломоносова, 1959.
13. Гальперин Г. Д., Котляр Л. И. Некоторые вопросы расчета и конструирования воздушных сепараторов для зерна. — «Пищевое машиностроение», ВНИЭКИпродмаш, 1961, № 16—17.
14. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г. Об аналогии между псевдооживленным слоем зернистого материала и капельной жидкостью. — «Химическая промышленность», 1961, № 11.
15. Гельперин Н. И. Истечение азрированного и псевдооживленного материала через отверстие в вертикальной стенке. — «Химическая промышленность», 1968, № 6.
16. Гладков Н. Р. Зерноочистительные машины. — М.: Машгиз, 1961.
17. Гортинский В. В. Теоретические основы послойного движения продуктов измельчения зерна на сите отсева. — «Труды ВНИИЗ», 1960, вып. 39.
18. Гортинский В. В. Сортирование сыпучих тел при их послойном движении по ситам. — «Труды ВИМ», 1964, т. 34.
19. Гортинский В. В. Основные направления научно-технического прогресса в области сепарирования. — М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1976, № 5.
20. Гортинский В. В., Альтерман А. И. Исследование приемно-распределительного устройства конструкции ВНИИЗ. — «Труды ВНИИЗ», 1960, вып. XXXVII.
21. Гортинский В. В., Дулаев В. Г. Транспортирование сыпучих материалов в горизонтальных каналах машин с круговыми поступательными движениями. — «Труды ВНИИЗ», 1968, вып. 64.
22. Гортинский В. В., Емельянчик Н. П. Вопросы расчета и проектирования вращающихся инерционных щеток. — «Труды ВНИИЗ», 1969, вып. 66.
23. Гортинский В. В., Жиганков Б. В. Состояние и развитие техники сепарирования смеси шелушенного и нешелушенного риса. — М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1970.
24. Горячкин В. П. Собр. соч. т. I. — М.: Колос, 1965.
25. Гончаров Е. С. О подобии кинематических режимов плоских и вертикальных цилиндрических виброцентробежных решет. — «Труды ВНИИЗ», 1973, вып. 78.
26. Движение материальной частицы по шероховатой поверхности, совершающей колебания, близкие к круговым поступательным/[И. И. Блехман, В. В. Гортинский, В. Г. Дулаев и др.]. — «Известия АН СССР. Механика твердого тела», 1971, № 4.
27. Демидов А. Р., Демин Г. С. Расчет основных параметров сит с возвратно-поступательным движением для выделения мелких примесей из пшеницы и ржи. — «Сообщения и рефераты ВНИИЗ», 1962, вып. 1.
28. Демский А. Б., Борискин М. А., Лесик Ю. А. Исследование пневмосепарирующих устройств зерновых сепараторов. — «Труды ВНИЭКИ-продмаш», 1970, № 21.
29. Демский А. Б., Лесик Ю. А., Тамаров Е. В. Исследование приемно-распределительных устройств зерновых сепараторов. — «Труды ВНИЭКИ-продмаш», 1970, № 21.
30. Демский А. Б., Борискин М. А., Тамаров Е. В. Исследование и создание сепараторов с новыми решетно-ситовыми корпусами, приводными механизмами и очистителями решет. — «Труды ВНИЭКИпродмаш», 1970, № 21.
31. Демский А. Б. Комплектные зерноперерабатывающие установки. — М.: Колос, 1978.
32. Демский А. Б., Веденъев В. Ф. Основные направления совершенствования пневмосепарирующего зерноочистительного оборудования. — М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1976.
33. Дзядзю А. М. Пневматический транспорт на зерноперерабатывающих предприятиях. — М.: Заготиздат, 1961.
34. Дрогалин К. В., Карпова К. Е. Влияние потоков воздуха на движение зернопродуктов по ситам в ситовесечных машинах. — «Труды ВНИИЗ», 1961, вып. 40.
35. Емельянчик Н. П. К вопросу об очистке сит в отсевах. — «Труды ВНИИЗ», 1964, вып. 53.
36. Жиганков Б. В. К принципу действия крупотделителя БКО-1,5. — «Машиностроение для пищевой промышленности», ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1969, вып. 6.
37. Жиганков Б. В. О делимости смеси шелушенного и нешелушенного риса. — «Труды ВНИИЗ», 1969, вып. 67.
38. Жислин Я. М. Технология и оборудование крупяного производства. — М.: Колос, 1966.
39. Журавлев В. Ф., Богатырев Ю. А. Определение скорости фильтрации воздуха по длине аэрогравитационного транспортера. — «Мукомольно-элеваторная промышленность», 1970, № 6.
40. Ивлева Н. М. О влиянии нагрузки и угла наклона к горизонту на процесс работы цилиндрического триера. — «Земледельческая механика». — М.: Машиностроение, 1965. Сб. трудов, т. IV.
41. Кожуховский И. Е. Зерноочистительные машины. — М.: Машиностроение, 1965.
42. Константинов О. Я. Расчет и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений. — Л.: Машиностроение, 1967.
43. Конструкция и эксплуатация сит просеивающих машин/[Л. И. Котляр, Н. Я. Кестельман, Н. В. Останчук и др.]. — М.: Заготиздат, 1963.
44. Ласкин М. С. Новый крупотделитель БКО. — «Машиностроение для мельнично-элеваторной промышленности», ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1969, № 2.

45. Лейкин Я. И. Основы классификации просеивающих машин. — «Труды ВНИИЗ», 1963, вып. 42.
46. Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. — М.: Машгиз, 1962.
47. Мачихина Л. И. Теоретические предпосылки к анализу процесса камнеотборочных машин вибропневматического принципа действия. — «Труды ВНИИЗ», 1967, вып. 60.
48. Машины для послеуборочной поточной обработки семян/ [З. П. Тиц, В. И. Анискин, Г. А. Баснаган и др.]. — М.: Машиностроение, 1967.
49. Непомнящий Е. А. Математическое описание кинетики процесса сепарирования сыпучих материалов. — «Труды ВНИИЗ», 1967, вып. 61—62.
50. О повышении надежности и долговечности мельнично-элеваторного оборудования/[М. А. Борискин, А. Б. Демский, В. И. Борисов и др.]. — М.: НИИМАШ, 1966.
51. Орлов П. И. Основы конструирования. — М.: Машиностроение, 1968.
52. Очистка зерна на хлебоприемных предприятиях/[Г. С. Демин, Г. Т. Павловский, М. А. Теленгатор и др.]. — М.: Колос, 1968.
53. Павловский Г. Т. К автоматизации процесса очистки зерна и расчету оборудования поточных линий. — Научно-технический бюллетень ВИМ. М.: 1968, вып. 4.
54. Птушкина Г. Е. Некоторые физико-механические свойства минеральных примесей зерна и методы их определения. — «Сообщения и рефераты ВНИИЗ», 1961, вып. 1.
55. Птушкина Г. Е. Современные зерноочистительные машины. — М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1970.
56. Перцовский Е. С. К теории очистки зерна в пневматическом сепараторе. — «Труды ВНИИЗ», 1970, вып. 68.
57. Платонов П. Н., Мерко И. Т. Технология и автоматизация мельниц. Вопросы технологии современного мукомольного и крупяного производства. — Труды научной конференции ОТИПП им. М. В. Ломоносова. М.: 1967, вып. 61—62.
58. Руководство по выбору и эксплуатации рассевов/[В. В. Гортинский, А. И. Альтерман, В. Г. Дулаев и др.]. — М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1970.
59. Соколов А. Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. — М.: Колос, 1975.
60. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин./ Под ред. А. В. Красниченко, т. 2. — М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1962.
61. Справочник мукомола, крупяника и комбикормщика/[Г. М. Бардышев, С. С. Замятин, В. Г. Кулак и др.]. — М.: Колос, 1973.
62. Справочник по оборудованию зерноперерабатывающих предприятий/[А. Б. Демский, М. А. Борискин, Ш. С. Камалетдинов и др.]. — М.: Колос, 1970.
63. Урханов Н. А. Повышение эффективности работы цилиндрических триеров. — М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1970.
64. Цециновский В. М. К методике определения технологического эффекта зерноочистительных машин. — «Труды ВНИИЗ», 1967, вып. 57.
65. Цециновский В. М., Шапиро И. Г. Влияние геометрии «трудных» зерен и отверстий сита на условия сортирования. — «Труды ВНИИЗ», 1970, вып. 68.
66. Чиркова Л. В. О методах и средствах очистки зернопродуктов от ферропримесей. — «Труды ВНИИЗ», 1967, вып. 57.
67. Чиркова Л. В., Богомоллов М. Н. Изучение смывающего эффекта применительно к магнитным сепараторам с гравитационным перемещением продукта. — «Труды ВНИИЗ», 1968, вып. 64.
68. Чугаев Р. Р. Гидравлика. — Л.: Энергия, 1975.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов	3
Предисловие	4
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ СЕПАРИРОВАНИЯ	
Глава 1. Общие сведения и характеристика процессов сепарирования	7
§ 1. Классификация и краткая характеристика процессов сепарирования	7
§ 2. Общие сведения о сепарируемых материалах	12
§ 3. Показатели технологической эффективности сепарирующих машин	21
§ 4. Основные требования к сепарирующим машинам	26
Глава 2. Теоретические основы вибрационного перемещения	45
§ 1. Перемещение частицы при прямолинейных наклонных колебаниях	47
§ 2. Перемещение частицы при круговых колебаниях в вертикальной плоскости	64
§ 3. Перемещение частицы при круговых колебаниях в горизонтальной плоскости	76
Глава 3. Ситовое сепарирование	102
§ 1. Самосортирование частиц по плотности	104
§ 2. Самосортирование частиц по крупности (размерам)	110
§ 3. Просеивание отдельной частицы	114
§ 4. Просеивание частицы при движении сыпучего тела	118
§ 5. Эффективность ситового сепарирования	129
Глава 4. Вибропневматическое сепарирование	133
Глава 5. Вибрационное сепарирование на плоских ячеистых поверхностях	141
Глава 6. Виброударное сепарирование	150
Глава 7. Пневматическое сепарирование	160
§ 1. Сепарирование в вертикальном воздушном потоке	161
§ 2. Зависимость эффективности процесса пневмосепарирования от различных факторов	181
§ 3. Пневматическое сепарирование в псевдооживленном слое	186
§ 4. Прогнозирование технологической эффективности пневмосепарирования	195
Глава 8. Магнитное сепарирование	203
§ 1. Процесс сепарирования в магнитных аппаратах с нижним расположением магнитов	204
§ 2. Определение силы притяжения металломагнитных примесей	213
Глава 9. Триерование	216
§ 1. Цилиндрические триеры	217
§ 2. Дисковые триеры	223

Глава 10. Процессы сепарирования в технологических линиях очистки зерна	226
§ 1. Показатель направленности процесса фракционирования	228
§ 2. Процесс фракционирования на камнеотделительной машине А1-БОК	231
§ 3. Теоретические предпосылки к созданию технологических линий с поэтапным фракционированием	233

2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА СЕПАРИРУЮЩИХ МАШИН

Глава 11. Ситовые сепарирующие устройства	243
§ 1. Устройства с прямолинейными колебаниями сит	244
§ 2. Устройства с круговыми колебаниями сит в горизонтальной плоскости	249
Глава 12. Пневмосепарирующие устройства	257
§ 1. Пневмосепарирующие каналы	257
§ 2. Каскадные пневмосепарирующие каналы	273
§ 3. Относоосаждающие камеры	278
§ 4. Герметизирующие устройства	281
Глава 13. Устройства для очистки сит	285
§ 1. Теория и расчет вращающихся инерционных щеток	290
§ 2. Влияние различных факторов на забиваемость сит	294
Глава 14. Основные направления развития техники и технологии сепарирования	297
Указатель литературы	3 0

Владимир Владимирович Гортинский, Альберт Брониславович Демский,
Михаил Андреевич Борискин

ПРОЦЕССЫ СЕПАРИРОВАНИЯ НА ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Редакторы *Н. А. Россошанская, Н. П. Вейсберг*
Художник *А. Е. Григорьев*
Художественный редактор *Н. М. Коровина*
Технические редакторы *В. Ф. Андреевкова, Н. В. Новикова*
Корректор *А. В. Пригарина*

ИБ № 2187

Сдано в набор 18.10.79. Подписано к печати 18.04.80. Т-05161. Формат 60×90^{1/16}. Бумага тип. № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 19. Уч.-изд. л. 20,07. Изд. № 43. Тираж 4000 экз. Заказ № 953. Цена 1 р. 50 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Белоцерковская книжная фабрика республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Государственного комитета Украинской ССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли, 256400, г. Белая Церковь, ул. К. Маркса, 4.