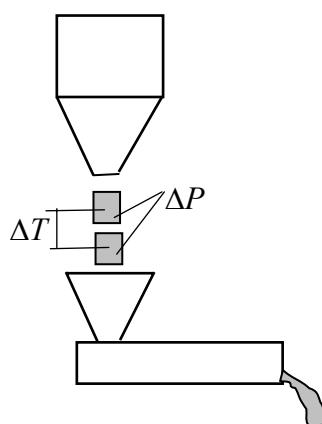


С.В. ПЕРШИНА, А.В. КАТАЛЫМОВ,
В.Г. ОДНОЛЬКО, В.Ф. ПЕРШИН

ВЕСОВОЕ ДОЗИРОВАНИЕ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ



Москва
"Машиностроение"
2009

УДК 678.025.1:66.067.122.2

ББК Л116.3-5

П279

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
Московского государственного университета инженерной экологии

В.С.-Х. Ким

Доктор технических наук, профессор
Тамбовского государственного технического университета

П.С. Беляев

П279 Весовое дозирование зернистых материалов /
С.В. Першина, А.В. Каталымов, В.Г. Однолько,
В.Ф. Першин. – М.: Машиностроение, 2009. – 260
с. – 400 экз.

ISBN 978-5-94275-484-6

Дана методика расчета теоретически возможной максимальной точности весового дозирования, что поможет объективно оценить рекламируемые характеристики серийно выпускаемых весовых дозаторов непрерывного действия. Особое внимание уделено технологии двухстадийного непрерывного дозирования, которая была предложена и реализована при непосредственном участии авторского коллектива.

Для инженерно-технических работников, занимающихся переработкой сыпучих материалов, преподавателей, аспирантов и студентов машиностроительных и технологических специальностей.

УДК 678.025.1:66.067.122.2

ББК Л116.3-5

ISBN 978-5-94275-484-6

© С.В. Першина, А.В.
Каталымов, В.Г. Однолько,
В.Ф. Першин, 2009

**С.В. ПЕРШИНА, А.В. КАТАЛЫМОВ,
В.Г. ОДНОЛЬКО, В.Ф. ПЕРШИН**

**ВЕСОВОЕ ДОЗИРОВАНИЕ
ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Москва
"Машиностроение"
2009

Научное издание

ПЕРШИНА Снежана Владимировна,
КАТАЛЫМОВ Анатолий Васильевич,
ОДНОЛЬКО Валерий Григорьевич,
ПЕРШИН Владимир Федорович

**ВЕСОВОЕ ДОЗИРОВАНИЕ
ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Редактор Т.М. Глинкина
Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Сдано в набор 14.05.2009 г. Подписано в печать 18.08.2009 г.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,1. Уч.-изд. л. 15,0.
Тираж 400 экз. Заказ 289

ООО "Издательство Машиностроение",
107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Подготовлено к печати и отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

По вопросам приобретения книги обращаться по телефону 8(4752)638108
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

ВВЕДЕНИЕ

Согласно классификации основных процессов химической технологии, дозирование относится к механическим процессам, т.е. к процессам, скорость которых определяется, в основном, законами физики твердого тела.

В русском языке обычно под сыпучим материалом (или сыпучим телом) подразумевают дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. Дисперсная система – это образование из двух или большего числа фаз (тел) с сильно развитой поверхностью раздела между ними. Термин "сыпучий материал" далеко не всегда дает полное представление о состоянии системы, поскольку дисперсные системы часто являются не свободно текучими, а связными, т.е. обладают слабой подвижностью частиц относительно друг друга. Термин "дисперсная среда" также не дает однозначного определения системе, поскольку дисперсными называют системы газ–жидкость (капли), жидкость–твердое (частицы) и т.д. В англоязычной транскрипции существует более точный термин "PARTICULATE SOLIDS". Данный термин достаточно точно определяет систему – твердый материал в зернистом состоянии. Учитывая вышесказанное, в дальнейшем для определения системы, состоящей из большого количества твердых частиц, контактирующих друг с другом, будем использовать термин "зернистые" материалы. Следует отметить, что этот термин ранее использовался в научной и технической литературе. Под термином "сыпучие" материалы будем понимать свободно текучие зернистые материалы. Совершенно очевидно, что термин "сыпучий" материал не является достаточно точным, поскольку до настоящего времени отсутствуют общепринятые критерии разделения зернистых материалов на связные и несвязные (свободно текущие). В то же время на практике существует достаточно точное и понятное разделение. Если при движении зернистого материала образуется поток из отдельных частиц, контактирующих друг с другом, и при этом скорость и траектория каждой частицы могут изменяться в достаточно широких пределах, то обычно считают, что это сыпучий материал. Если при движении образуются заметные области, в которых большое количество частиц имеет одинаковые траектории и скорости движения, то материал считается плохо сыпучим или связанным.

Согласно общепринятому определению БСЭ, агрегатные состояния вещества – это состояния одного и того же вещества, переходы между которыми сопровождаются скачкообразными изменениями свободной энергии, энтропии, плотности и других основных физических свойств. Традиционно выделяют три агрегатных состояния вещества: газ, жидкость, твердое тело. К трем указанным агрегатным состояниям вещества часто причисляют еще и плазму. Существование нескольких агрегатных состояний обусловлено различиями в характере теплового движения молекул (атомов) вещества и в их взаимодействии. С этих позиций зернистые материалы, несомненно, относятся к твердым телам. С другой стороны, основные закономерности физики твердого тела строго выполняются только в пределах отдельной частицы. Применительно к большому числу контактирующих частиц эти закономерности строго не выполняются, прежде всего, потому, что функции напряжений и деформаций имеют разрывы на границе каждой частицы. Кроме этого, есть достаточные основания полагать, что зернистым материалам присущи особые закономерности, которые не свойственны газам, жидкостям и твердым телам. Таким образом, зернистые материалы, по крайней мере с точки зрения их переработки, следует рассматривать как самостоятельную субстанцию, которой присущи характерные физико-механические свойства.

Глава 5 написана С.В. Першиной, остальные главы – совместно.

ЗЕРНИСТЫЙ МАТЕРИАЛ КАК ОБЪЕКТ ДОЗИРОВАНИЯ

1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Зернистые (сыпучие, гранулированные, порошкообразные) материалы, вроде песка или сахара, окружают человека и в повседневной жизни, и в природе (геологические и тектонические процессы). Они широко применяются в различных технологических процессах. Относительно недавно появился новый термин – порошковые технологии. Зернистые материалы имеют некоторые свойства как твердых тел, так и жидкостей и газов, а в некоторых условиях ведут себя совершенно особым образом. Необычные свойства сыпучих материалов как твердых тел проявляются уже в состоянии покоя. Если на достаточно толстый слой материала (песка на пляже) положить груз, то он, конечно, вызовет напряжения и дополнительное давление в толще песка. Однако, как показали эксперименты нескольких групп, проведенные в 1995 году, величина этих напряжений очень быстро уменьшается с глубиной – по экспоненциальному закону. Кроме того, экспериментаторы четко видели, что области наибольших напряжений имеют ветвистую структуру. Другими словами, вес груза удерживается не всей площадью, а редкими узкими "столбами" напряжений. Другое похожее явление было отмечено более 100 лет назад Янссеном: давление столба песка в высокой вертикальной трубе сначала растет с глубиной, а начиная с некоторого значения перестает от нее зависеть – все лишнее давление передается на стенки сосуда. На самом деле, именно благодаря этому явлению скорость хода песочных часов практически не зависит от того, сколько песка еще осталось. Гранулированные вещества ведут себя при определенных условиях и как жидкости. Всем известно, что если угол наклона песчаной горы станет достаточно крутым – образуется лавина, песок начинает стекать. То, что скорость течения зависит от угла наклона – неудивительно, это справедливо и для жидкости. Однако обнаружено, что течет всего лишь тонкий слой песка, толщиной 3-4 диаметра песчинки. На больших глубинах никакого движения не происходит вообще. Если сосуд с песком начать мелко трясти, то тем самым можно заставить песчинки двигаться, сталкиваться. Движение всего песка начинает походить при этом на движение жидкости. Такие эксперименты проводил еще Фарадей в 1831 году. Им были отмечены необычные локальные образования, иногда достаточно стабильные, которые появлялись на поверхности зернистых материалов. Эти образования были изучены только в последние годы. Были обнаружены локализованные колебания – осциллоны – единичные всплески толщиной в 10–30 диаметров песчинок. Будучи необычайно стабильными, они не только не диссипируют и не разрушаются, а могут даже мигрировать вдоль поверхности, взаимодействуя друг с другом, образуя своего рода связанные состояния и даже кристаллы! Кроме таких хитрых поверхностных явлений, много занимательного происходит и в самой толще гранулированного материала, а именно – конвекция. В цилиндрическом сосуде она происходит вполне определенным образом: в центре сосуда идет поток вверх, а по краям, вдоль стенок, в тонком слое – вниз. Интересно, что при такой конвекции уже не важна масса частиц в смеси разнородных зернистых материалов, важен только размер частиц. Именно благодаря этому частицы гораздо большего размера всплывают на поверхность и больше не опускаются: они просто не могут последовать за тонким конвективным потоком вдоль стенок. Надо отметить, что характер конвективного движения сильно зависит от формы сосуда – в коническом сосуде, к примеру, конвективное движение будет как раз противоположным. В последнее время обнаружилось много общего между поведением вибрирующей массы гранулированного материала и суспензий – взвесей мелких твердых частиц в жидкости. Хотя на уровне отдельных частиц эти две системы ведут себя совершенно по-разному, их поведение в целом оказалось похожим. В частности, наблюдались такие же осциллоны с очень похожим поведением. Возможно, это говорит о том, что нелинейная динамика, т.е. характер математических законов, управляющих движением обеих систем, одинаков. Наконец, при отсутствии силы тяжести зернистые материалы ведут себя подобно газу. Однако, в отличие от атомных столкновений, соударения песчинок без внешнего источника энергии прекратятся. Это приводит к еще одному неожиданному явлению – так называемому "неупругому коллапсу". Если в таком "песчаном газе" при каждом соударении теряется малая доля энергии, то весь газ остывает практически равномерно и остается почти однородным. Если же столкновения становятся сильно неупругими – то образуются "кластеры", области абсолютно застывших частиц, не двигающихся друг относительно друга. Интересно, что эти кластеры выглядят как тонкие длинные нити, вдоль которых и собираются все песчинки после большого числа столкновений. Наконец, при большой концентрации песчинок эти кластеры могут образовывать упорядоченные структуры, наподобие кристалла. Так что здесь мы видим нечто, похожее на самый настоящий фазовый переход. Теоретики пока бессильны описать все открытые явления. Даже динамика таких простых объектов, как зернистые материалы, становится очень сложной, когда речь идет о большом числе частиц. Еще предстоит большая работа для того, чтобы понять и научиться использовать все процессы, происходящие с обыкновенным песком. Тем не менее, накоплен значительный опыт выявления и определения характеристик зернистых материалов, необходимых для расчета

параметров различных технологических процессов. В зависимости от размера частиц, зернистый материал может быть в следующих состояниях: пылевидном ($d < 0,05$ мм); порошкообразном ($0,05 < d < 0,5$ мм); мелкозернистым ($0,5 < d < 2$ мм); крупнозернистым ($2 < d < 10$ мм); кусковым ($d > 10$ мм) [1]. Физико-механические свойства или характеристики зернистых материалов обычно разделяют на первичные и вторичные.

К первичным относятся свойства, присущие отдельной частице и материалу, из которого она состоит. Вторичные характеристики присущи совокупности большого числа частиц, контактирующих друг с другом, т.е. они характеризуют зернистый материал в целом.

1.2. ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ

К первичным характеристикам, прежде всего, относятся размер и форма частицы. Размеры частиц могут изменяться в очень широких пределах, от тысячных долей миллиметра (ультрадисперсные порошки) до метров (крупнокусковой материал). Форма частиц также может изменяться в широком диапазоне, от шарообразной до игольчатой. Разнообразие форм затрудняет количественную оценку размера даже одиночной частицы. Для устранения данного препятствия введено понятие о среднем или эквивалентном диаметре частицы. Так, например, при эквивалентности по объему V эквивалентный диаметр d_V рассчитывают по следующей формуле:

$$d_V = (6V/\pi)^{1/3}, \quad (1.1)$$

а при эквивалентности по удельной поверхности:

$$d_S = 6/S, \quad (1.2)$$

где $S = S_{\text{пол}}/V$ – удельная поверхность частицы, $S_{\text{пол}}$ – ее полная поверхность.

Величину S определяют специальным прибором, принцип действия которого основан на измерении сопротивления слоя определенной порции зернистого материала потоку прокачиваемого через него газа.

Если все частицы рассматриваемого зернистого материала имеют одинаковый размер, то материал является монодисперсным. На практике чаще приходится иметь дело с полидисперсным зернистым материалом. Полидисперсность материала характеризуется гранулометрическим составом, который показывает, какую долю или процент по массе, объему или числу частиц составляют определенные частицы или группы частиц во всей анализируемой пробе. Наиболее часто для аналитического описания функции распределения частиц зернистого материала по тому или иному признаку используют законы Розина-Рамлера и нормально-логарифмический [2].

В настоящее время для определения гранулометрического состава зернистых материалов с размерами частиц более 0,5 мкм наиболее широко используют ситовый рассев, микроскопия, лазерная гранулометрия, седиментация.

Ситовый анализ применяют для зернистых материалов с размером частиц от 40 мкм до нескольких миллиметров. Принцип анализа заключается в том, что определенную навеску исследуемого продукта пропускают через набор сит. Навеска исследуемого материала помещается на верхнее сито. Собранную стопку сит с материалом закрепляют на столе вибропривода и включают вибропривод на определенное время. После просеивания взвешивают остатки материала на каждом из сит, а также частицы, прошедшие через самое тонкое сито в поддон. По результатам ситового анализа строят кривую распределения массы частиц по их размерам. Для этого в прямоугольной системе координат по вертикальной оси откладывают массовую долю всех фракций, прошедших через данное сито, а по горизонтальной оси – размер ячейки этого сита (т.е. верхний размер фракции частиц).

Средний размер частиц \bar{x} полидисперсного материала определяется из результатов гранулометрического состава, используя следующую формулу [3]:

$$\bar{x} = \frac{x_1 a_1 + x_2 a_2 + x_3 a_3 + \dots}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots} = \frac{\sum_{i=1} x_i a_i}{100}, \quad (1.3)$$

где \bar{x} – средний размер частиц; x_1, x_2, x_3 – средние размеры зерен отдельных фракций ситового анализа, определяемые как полусумма размеров отверстий двух сит – ближайшего верхнего, через которое прошли все зерна фракции, и сита, на котором зерна этой фракции задержались, не просеявшись; a_1, a_2, a_3 – массовые доли каждой фракции (остатки на ситах), $\sum a_i^n = 100\%$.

Степень неравномерности гранулометрического состава в объеме сыпучего материала оценивают параметром вариации или неоднородности $V(d)$ [3]:

$$V(d) = \frac{s}{d_{\text{cp}}}, \quad (1.4)$$

где $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d_{\text{cp}})^2}{n-1}}$, $d_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n}$ – соответственно среднеквадратичное отклонение и статистический средний размер частиц в объеме сыпучего материала; d_i – статистический среднемассовый диаметр частиц в i -й пробе; n – число проб.

Значение $V(d)$ находится в интервале от нуля до единицы. Чем меньше значение $V(d)$, тем степень неоднородности гранулометрического состава по объему материала становится меньше.

На рисунке 1.1 показаны примеры гистограмм распределения частиц по размерам и кривые гранулометрического состава. Дифференциальная кривая (рис. 1.1, а) показывает содержание (в долях или процентах) определенной фракции частиц, а интегральная (рис. 1.1, б) – накопленную долю частиц в диапазоне от минимального диаметра до текущего.

Анализаторы ситовые А-12, А-20, А-30 [4] предназначены для сухого рассева в периодическом режиме сыпучих материалов на ряд фракций по крупности частиц. Анализаторы относятся к оборудованию лабораторного класса и применяются в различных отраслях промышленности, таких как: горнодобывающая, металлургическая, строительная, химическая, пищевая, фармацевтическая, производство строительных материалов, производство химических удобрений, парфюмерная и многих других.

Данные анализаторы позволяют определять гранулометрический состав в диапазоне 0,04...2,8 мм.

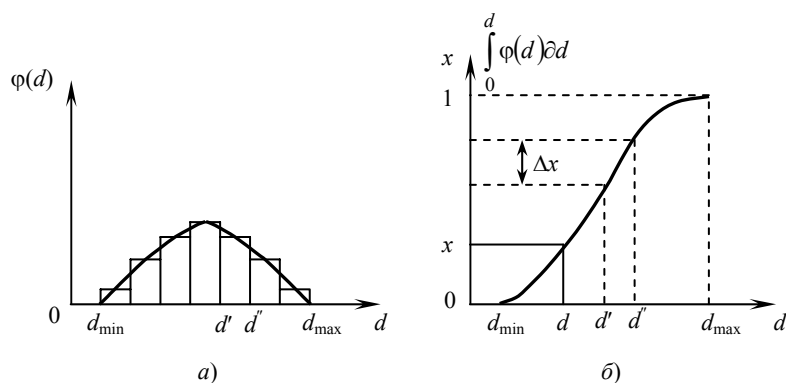


Рис. 1.1. Гистограммы распределения дискретных частиц по размерам:

а – дифференциальная кривая распределения;

б – интегральная кривая распределения

Электронный измеритель ЭИП-11т [5] предназначен для определения дисперсного состава тонкоизмельченных порошкообразных материалов (тальк, каолин, кальцит, мел, известняк, цеолит, карбид кремния, цемент, слюда, графит, пигменты и др.). В данном устройстве используется электроприципитационный способ анализа, что позволяет определять размер частиц в диапазоне 0,5...63 мкм.

Принцип действия счетчиков Коултера заключается в измерении импульсов электрического тока, протекающего между электродами, помещенными в сосуды с электролитом, которые соединены капилляром [6].

Амплитуда импульса тока пропорциональна объему частицы, проходящей по этому капилляру при перекачке суспензии из одного сосуда в другой. Получающиеся импульсы с помощью электронного устройства анализируются ЭВМ, которая в темпе эксперимента производит подсчет количества и относительного содержания частиц каждого размера. Результаты выводятся на дисплей, самописец или выдаются в цифровой форме.

Счетчики Коултера, выпускаемые фирмами Франции, Англии, Японии, являются высокоавтоматизированными современными приборами, нашедшими широкое применение для научных исследований. Имеется несколько модификаций счетчиков. Счетчик Коултера – Multisizer [7] позволяет определять размеры частиц в диапазоне от 0,4 до 1200 мкм.

Существенным недостатком счетчиков Коултера является необходимость калибровать прибор для каждого материала и для каждого электролита. Довольно сложным является подбор электролита и ПАВ для конкретного вещества для исключения коагуляции частиц и отбор представительной пробы, поскольку масса исследуемой пробы порядка 0,001 г. Сложность прибора, его высокая стоимость и недостаточная представительность пробы не позволяют использовать эти приборы для серийных анализов в производственных условиях.

Особенностью седиментационных методов является то, что определяемый с их помощью размер характеризует не только геометрические параметры частиц, но и учитывает их взаимодействие с

дисперсионной средой через коэффициент сопротивления, что важно для многих процессов, связанных с получением и переработкой различных материалов в порошкообразном виде. Следует отметить, что седиментация используется в нанотехнологиях, так, например, одной из важнейших стадий формирования фотонного кристалла на основе синтетических опалов является седиментация наночастиц SiO_2 [8].

Особый интерес представляют работы [9 – 13], в которых рассмотрен оригинальный метод седиментации частиц из так называемого стартового слоя. Создание на зеркале дисперсионной жидкости стартового слоя частиц обеспечивается сочетанием физических свойств двух жидкостей и их химическим взаимодействием. Причем, одной из жидкостей является седиментационная среда, а другая жидкость используется для ввода анализируемых частиц в эту среду.

Основными измеряемыми величинами при гранулометрическом анализе являются размер частиц и их количество (число или масса частиц каждого измеряемого размера). Размер частиц при их осаждении в вязкой среде определяется с применением упрощенного уравнения движения Навье-Стокса при допущении существенного превалирования вязких сил над инерционными, когда значения числа Рейнольдса $\text{Re} < 1$:

$$\frac{dw}{d\tau} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{ТВ}}} \right) - \frac{\zeta \rho w^2}{2m} f. \quad (1.5)$$

Если скорость осаждения частицы постоянна $(dw/d\tau) = 0$, тогда при введении шарообразной частицы массой $m = (\pi \delta^3 / 6) \rho_{\text{ТВ}}$ и площадью поперечного сечения частиц $f = \pi \delta^2 / 4$ из равенства сил, действующих на частицу, можно получить выражение для скорости ее осаждения:

$$W_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4 (\rho_{\text{ТВ}} - \rho) g \delta}{3 \rho \zeta}}, \quad (1.6)$$

где $\rho_{\text{ТВ}}$, ρ – плотность частиц и седиментационной жидкости; ζ – коэффициент сопротивления.

Принцип действия весового седиментометра основан на непрерывном измерении во времени веса накопившегося осадка. Считая, что $W = \text{const} = H/t$ (H – высота осаждения), из (1.6) можно получить выражение для расчета в каждый момент времени t размера осевших частиц:

$$\delta = \frac{3}{4} \frac{\rho}{(\rho_{\text{ТВ}} - \rho)} \frac{\zeta}{g} \left(\frac{H}{t} \right)^2. \quad (1.7)$$

Из (1.7) видно, что при всех заданных величинах размер осевших частиц будет в первую очередь определяться коэффициентом сопротивления ζ , учитывающим гидродинамические характеристики движения твердой частицы в вязкой среде. Обычно при седиментационном анализе в качестве коэффициента сопротивления используется известный закон Стокса. Однако действие закона Стокса распространяется на движение частиц только очень малых размеров. Для расширения диапазонов размеров анализируемых частиц в разработанном программно-измерительном комплексе [14] используются другие, нелинейные законы сопротивления.

Важной частью математического аппарата гранулометрического анализа при седиментации является теоретическое описание кривых накопления аналитическими зависимостями, которых в настоящее время существует достаточно много. Обилие же существующих дисперсных материалов, разнообразие методов их получения и переработки, а также весьма широкий спектр их физико-механических свойств не позволяют создать универсальную зависимость, пригодную в равной степени для всех существующих материалов и процессов.

Наиболее известными из аналитических зависимостей считаются логарифмически-нормальный закон и обобщенный степенной, частным случаем которого является уравнение Розина-Раммлера, которое можно записать в виде

$$f(\delta) = bA\delta^{a-1} \exp(-b\delta^2), \quad (1.8)$$

где A – постоянная нормировки; a и b – параметры распределения.

Дифференциальная функция распределения частиц по размерам в данном случае будет выглядеть следующим образом:

$$f(\delta) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\sqrt{2\pi\delta\sigma_i}} \exp \left[-\frac{(\ln \delta - \ln \delta_{0,i})^2}{2\sigma_i^2} \right], \quad (1.9)$$

где A_i – весовые множители; $\delta_{0,i}$ – медиана распределения; σ_i^2 – стандартное (среднеквадратическое) отклонение $\ln \delta$ от их среднего значения.

Для определения неизвестных параметров ряда ($A_i, \delta_{0,i}, \sigma_i^2$) используется алгоритм оптимизации функции симплекс-методом.

В любом методе измерений при гранулометрическом анализе обязательным является статистическая обработка опытных данных. Оценка точности измерений осуществляется на основе анализа статистической обработки каждого j -го вариационного ряда массовых содержаний по опытам. Статистическая обработка экспериментальных данных, полученных на приборе ВС-4, предусматривает вычисление ряда статистических параметров распределений и критериев, на основании которых оценивается точность и достоверность результатов измерений.

Измерительная система регистрации веса осадка, схема которой показана на рис. 1.2, состоит из цилиндрического осадительного сосуда (кюветы), чувствительного элемента и датчика микроперемещений. Чувствительный элемент содержит приемную чашечку с поплавком и пружинным элементом. Чашечка сбора осадка чувствительного элемента является одновременно сердечником трансформаторного датчика микроперемещений. Перемещение катушки датчика относительно осадительного цилиндра осуществляется винтовыми штангами.

Блок сопряжения седиментометра ВС-4 предназначен для преобразования перемещения приемной чашечки в аналоговый электрический сигнал, дискретизации его 12-разрядным цифровым кодом, индикации уровня сигнала 3-уровневым светодиодным табло, передачи полученного кода внешнему устройству (компьютеру).

Разработка новой модели седиментометра ВС-4 с применением современной элементной базы позволила на порядок увеличить диапазон измерения веса пробы до 250 мг и расширить диапазон измеряемых размеров частиц от 1 до 300 мкм.

Для получения информации о гранулометрическом составе пробы и для дальнейшей статистической обработки данных полученная кумулятивная кривая описывается известными аппроксимационными формулами и законами с помощью функции модуля обработки данных. Для последующей работы с данными и вывода на печать в каждом из методов реализована функция автоматизированного экспорта результатов расчетов и графиков распределений в электронные таблицы MS Excel или в документ MS Word.

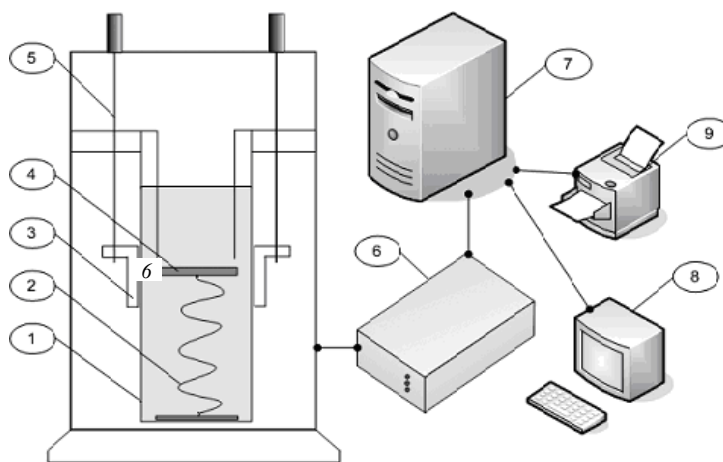


Рис. 1.2. Принципиальная схема программно-измерительного комплекса SDM-4:

- 1 – осадительный сосуд; 2 – чувствительная система;
3 – датчик микроперемещений; 4 – чашка сбора осадка;
5 – штанги передвижения датчика относительно чашки;
6 – блок сопряжения седиментометра; 7 – сервер; 8 – дисплей; 9 – принтер

Традиционные способы определения гранулометрического состава зернистых материалов, такие как рассев и седиментация медленны и трудоемки. В последнее время начали чаще применять оптические принципы измерения.

Принцип измерения частиц в анализаторе "Camsizer" [15] – теневое проектирование. Частицы проходят через луч между двумя источниками света и цифровыми камерами. Поток частиц воспроизводится камерами. Чрезвычайно короткое время экспозиции света, определяемое электронным затвором сканирующей матричной камеры, гарантирует точное определение области проектирования частиц. Для записи картинка с очень коротким временем экспозиции света специально разработан гомогенный источник света, который состоит из холодной катодной флуоресцентной лампы с микрооптическими системами призм. Размеры и форма частиц вычисляются в реальном времени при помощи современных алгоритмов обработки изображения. За счет запатентованного подсоединения двух камер с разными масштабами изображения к адаптивной измерительной системе возможен

чрезвычайно широкий диапазон измерения. Область применения данного анализатора от 30 мкм до 30 мм. Это не только позволяет системе выполнять анализ размеров частиц, но и провести детальные определения формы частицы.

Обычно приборы для измерения размеров частиц, работающие на базе лазера, основываются на анализе когерентной дифракции. Принцип измерения на "Crystalsizer" [16] базируется на применении некогерентного света для генерации интенсивностей дифракции. Применяется некогерентный и по своей геометрии плоский переменный источник света. Запись измерения производится при помощи единичного точечного детектора на оптической оси. Использование белого света ведет к ряду преимуществ. Прибор имеет очень незначительную чувствительность к влиянию окружающей среды. Плоский источник света получается при помощи галогеновой лампы, конденсатора и переключаемого жидкокристаллического дисплея. Запись измерения производится при помощи фотомножителя, перед которым помещена точечная диафрагма. Гравитационный диспергирующий модуль предназначен для неслипающихся материалов, а диспергирующий модуль сжатого воздуха – для анализа материалов с агломератами. Прибор измеряет частицы от 0,01 мкм до 2 мм. Через прибор пропускают 20...50 г порошка.

Прибор может анализировать различные материалы: сахар, муку, соль, фармацевтические препараты, стиральный порошок, песок, пластиковый порошок, химическое сырье, керамические и металлические порошки и др.

Автоматизированная оптико-электронная система контроля гранулометрического состава минеральных удобрений или других зернистых материалов "Cinderella" [17] предназначена для определения распределения гранул в анализируемой пробе по фракциям (диапазонам размеров), что позволяет оценить качество продукции и осуществить оперативную корректировку параметров технологического процесса. Принцип функционирования системы заключается в следующем. Исследуемая проба (до 2 кг) засыпается в резервуар устройства автоматической подачи гранул. Устройство автоматической подачи гранул осуществляет дозированное равномерное поступление гранул в блок видеорегистрации. Интенсивность подачи гранул адаптивно регулируется из программного модуля. Видеоинформация вводится в персональный компьютер и анализируется специализированным программным обеспечением. После обработки всей пробы процесс контроля автоматически останавливается, оператору предоставляется информация о распределении гранул в пробе по фракциям в печатной и графической форме. Таким образом, участие оператора в процессе контроля гранулометрического состава сводится к загрузке пробы в устройство подачи гранул и получению результатов анализа в печатной форме. Время обработки пробы массой 1 килограмм в среднем составляет 15...18 мин, при этом анализируется 20 кадров в секунду.

Данная система имеет ряд преимуществ перед ситовым анализом: небольшое время обработки пробы; расчет распределения элементов материала по произвольному набору фракций; получение широкого спектра параметров элементов материала (в том числе формы); малые затраты труда оператора вследствие высокой степени автоматизации процесса анализа (отсутствует необходимость в чистке сит, взвешивании и расчетах); возможность получения промежуточных результатов в процессе анализа; бесконтактный анализ; высокая степень наглядности предоставления результатов анализа.

Прибор ANALYSETTE 22 NanoTec является главной моделью в ряду лазерных анализаторов размера частиц фирмы FRITZSCH [18]. Благодаря эффекту обратного рассеивания, достижим диапазон измерений порядка 0,01 мкм. Полный диапазон измерений, простирающийся от 0,01 до 1000 мкм, может быть переключен на диапазон 15...2000 мкм благодаря эффекту расхождения лучей. Функция масштабирования позволяет получить гранулометрический состав образца при помощи 520 измерительных каналов. Для описания частиц могут быть получены как гранулометрический состав, так и параметры формы. С помощью ANALYSETTE 22 за один замер можно получить гранулометрический состав и провести анализ формы частиц. Две независимые направляющие системы для измерений в жидкой и сухой средах, совмещенные в одном приборе, позволяют проводить измерения по двум линиям. Прибор двойного назначения содержит модули, как жидкостного диспергирования, так и сухого. Основные характеристики прибора приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Метод анализа	Рассеивание лазерного излучения
Состояние образца	Сухой/Мокрый
Диапазон измерений при диспергировании в жидкости	0,01...2000 мкм
Диапазон измерений при сухом диспергировании	0,1 мкм...2000 мкм
Минимальное количество образца твердого вещества для получения суспензии или эмульсии	0,1...2 см ³ в 500 мл жидкости
Минимальное количество образца твердого вещества	5...50 см
Время замера	10 с
Цикл измерения	2 мин

1.3. ПЛОТНОСТЬ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Различают несколько видов плотности: истинная плотность (или просто плотность) – масса единицы объема частиц, не имеющих пор; кажущаяся плотность – масса единицы объема частиц, включая и объем закрытых пор; объемная плотность – масса единицы объема частиц, включая объем закрытых и открытых пор; насыпная плотность (насыпной вес) – масса единицы объема зернистого материала, свободно насыпанного в какую-либо емкость (в ее объем входят внутренние поры частиц и промежуточное пространство между ними).

Для определения плотности зернистых материалов (ρ) используют различные модификации пикнометра Ле-Шателье-Кондо (рис. 1.3).

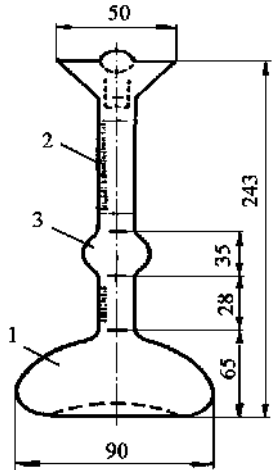


Рис. 1.3. Пикнометр Ле-Шателье-Кондо

Пикнометр имеет колбочку 1 и значительно удлиненную шейку 2. На расстоянии 28 мм от колбочки шейка пикнометра расширена в баллончик 3. Заканчивается шейка сверху воронкообразным расширением диаметром 50 мм. Вместо одной метки, как у обыкновенных пикнометров, на шейке этого пикнометра имеется объемная шкала, нулевое деление которой находится между колбочкой и баллончиком – указатель объема пикнометра при 20 °С. Наиболее удобны для определения плотности зернистых материалов пикнометры объемом 50 см³.

Пикнометрический метод определения плотности основан на определении объема жидкости, вытесненной порошком, масса которого предварительно измерена. Частное от деления массы материала на вытесненный им объем равно искомой плотности материала. В тех случаях, когда не удастся подобрать манометрическую жидкость, плотность зернистого материала можно определить методом вытеснения воздуха, называемым также манометрическим методом [19].

Метод определения насыпной плотности заключается в определении массы зернистого материала в известном объеме. Используется мерный цилиндр, в основном, диаметром $D = 30 \dots 100$ мм и высотой $H = 1,5 \dots 2,0 D$. Верхняя часть цилиндра (высотой $0,2 \dots 0,4 H$) соединена с нижней частью с возможностью поворота относительно вертикальной оси, проходящей через точку, лежащую на срединной поверхности обечайки цилиндра. Размеры мерного цилиндра определяются дисперсностью материала. Чем крупнее частицы материала, тем больше габариты мерного цилиндра.

Для определения насыпной плотности зернистый материал насыпают в мерный сосуд. Поворачивают верхнюю часть на 180 градусов. После поворота открытая поверхность материала представляет собой плоскость, проходящую по верхней границе нижней (рабочей) части мерного сосуда. Сосуд с материалом взвешивают и насыпную плотность ρ_n вычисляют по формуле

$$\rho_n = \frac{G_2 - G_1}{V}, \text{ г/см}^3, \quad (1.10)$$

где G_2 – масса мерного сосуда с зернистым материалом, г; G_1 – масса мерного сосуда, г; V – объем нижней части мерного сосуда, см³.

Между величинами ρ и ρ_n существует взаимосвязь:

$$\rho_n = \rho (1 - \varepsilon), \quad (1.11)$$

где ε – порозность зернистого материала, которая равна отношению объема свободного пространства между частицами к полному объему, который занимает зернистый материал.

Численное значение насыпной плотности существенно зависит от способа засыпки зернистого материала в емкость. Для одного и того же зернистого материала, даже при одинаковом диаметре частиц, насыпная плотность может изменяться в широком диапазоне, поскольку зависит от укладки или упаковки частиц [20–21].

Следует отметить, что не только в отечественной, но и в мировой практике, нет единого мнения не только относительно процедуры определения насыпной плотности, но и терминологии. Так, например, в мировой практике молочной промышленности этот показатель используется для управления процессами сушки молока, оценки качества конструкции распылителей и диагностики их состояния в процессе работы, а также в прогнозировании пригодности продукции к длительному хранению и при оценке состояния продукции после длительного хранения. Насыпная плотность как интегральный показатель структурно-механического состояния сухого продукта занимает в программах контроля качества первое место. Учитывая значения показателей насыпной плотности в технологическом и коммерческом контроле, в 1999 году был разработан ГОСТ Р 51462–99 "Продукты молочные сухие. Метод определения насыпной плотности". Необходимость углубленного химического контроля определяется по значениям насыпной плотности, полученным при трех различных условиях проведения измерения. В зависимости от этих условий различают три вида показателя насыпной плотности: объемная насыпная плотность, рыхлая насыпная плотность, насыпная плотность. В соответствии с

ГОСТом: объемная насыпная плотность – отношение массы продукта к его объему в мерном цилиндре без уплотнения продукта; рыхлая насыпная плотность – отношение массы продукта к его объему после 100 ударов с частотой 250 ± 15 в минуту; насыпная плотность – то же, но после 625 ударов. Ударное устройство должно согласно стандарту сбрасывать мерный цилиндр с высоты $3 \pm 0,1$ мм. Значение объемной насыпной плотности прямо связано с размерами частиц сухого молока, а значение рыхлой насыпной плотности – с их прочностью. Значения насыпной плотности до и после хранения продукта дают информацию о его поведении при восстановлении.

Показатели насыпной плотности широко используются за рубежом, как в технологических, так и в маркетинговых целях. В производственной практике эти показатели используются при управлении процессами дозирования детских продуктов в потребительскую тару с нормируемыми значениями совместимости.

Приборы, позволяющие измерять значения насыпных плотностей, ранее в России не выпускались. Впервые они были разработаны в институте молочной промышленности, а одно из машиностроительных предприятий Московской области освоило их производство. Прибору присвоено обозначение УИП-0,25 (установка по измерению плотности с мерным цилиндром объемом 250 см^3). Установка состоит из двух частей: механизма встряхивания с укрепленным на нем быстросъемным стеклянным мерным цилиндром и блока управления с расположенным в нем счетчиком импульсов, поступающих с механизма встряхивания.

Установка имеет следующие технические характеристики:

Масса загружаемого продукта, кг	0,1
Частота встряхивания, мин^{-1}	240
Амплитуда колебаний, мм	3
Параметры приводов:	
мощность, Вт	0,7
скорость вращения, об/мин	60
напряжение, В	220
Габаритные размеры, мм	
механизма встряхивания	$230 \times 205 \times 547$
блока управления	$217 \times 225 \times 117$
Масса, кг	9

Еще в меньшей степени регламентирована процедура определения плотности частиц, насыпной плотности песка и его пустотности.

Для определения насыпной плотности песок высушивают до постоянной массы при температуре $105 \dots 110$ °С. Высушенный песок насыпают в посуду известного объема и массы и взвешивают. Частное от деления значения массы песка (без посуды) на объем посуды составляет насыпную плотность песка. Так повторяют три раза и вычисляют по этим результатам среднее значение. Насыпная плотность сухих песков обычно колеблется в пределах $1450 \dots 1650 \text{ кг/м}^3$. Плотность частиц песка определяют в градуированном сосуде емкостью $250 \dots 500 \text{ см}^3$. Сосуд наполняют водой до отметки $0,5 \dots 0,7$ его объема и по шкале мерного цилиндра отсчитывают занимаемый ею объем V_1 . Затем берут приготовленную пробу песка ($150 \dots 200$ г) и осторожно всыпают ее в сосуд так, чтобы частицы песка не оседали на его стенках. Лучше сыпать песок мелкими порциями, чтобы воздух свободно удалялся из него и не образовывался вспененный слой на поверхности. Как только всыпали пробу, делают отсчет по шкале сосуда нового объема жидкости вместе с песком V_2 . Плотность ρ , г/см^3 , подсчитывают как частное от деления массы пробы песка G на разность $V_2 - V_1$, соответствующую примерному объему песка в плотном состоянии:

$$\rho = \frac{G}{V_2 - V_1}. \quad (1.12)$$

Опыт повторяют не менее трех раз и окончательный результат вычисляют как среднее арифметическое трехкратного определения. Для предварительных расчетов можно принимать плотность частиц песка $2650 \dots 2700 \text{ кг/м}^3$ ($2,65 \dots 2,7 \text{ г/см}^3$).

Пустотность песка имеет весьма важное значение при определении состава бетона и растворов: с увеличением пустотности увеличивается расход вяжущих. Объем пустот песка из зерен почти одинаковой крупности составляет $40 \dots 42$ %. При оптимальном сочетании крупных, средних и мелких зерен песка объем его пустот уменьшается до $30 \dots 35$ %. В песке удовлетворительного качества объем пустот не должен превышать 40 %, а хорошего – $37 \dots 38$ %.

Пустотность песка можно также приблизительно определить с помощью двух одинаковых цилиндрических стаканов. В первый насыпают сухой песок, уплотняют его легким постукиванием стакана по столу и сравнивают ножом или линейкой вровень с кромками стакана. Из другого стакана, до краев наполненного водой, осторожно переливают воду в первый до тех пор, пока в первом стакане вода не будет вровень с краями, т.е. пока она полностью не заполнит пустоты в песке. После этого замеряют высоту столба

воды, оставшейся во втором стакане. Разность высот стакана $B_{ст}$ и оставшейся в нем воды $B_{в}$, взятая относительно полной высоты стакана $B_{ст}$, составит приблизительное значение пустотности, %.

При определении насыпной плотности металлических порошков для устранения ошибок, вызванных субъективными факторами, процедура эксперимента регламентирована ГОСТ 19440–94. В соответствии с этим насыпную плотность можно определять двумя методами: метод с использованием воронки; метод волюмометра Скотта.

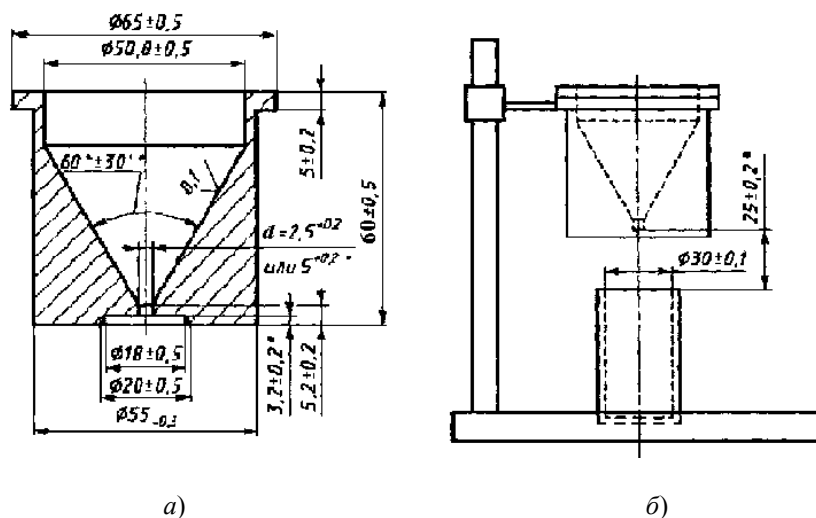


Рис. 1.4. Устройство для определения насыпной плотности металлических порошков:

a – воронка; *б* – устройство в сборе

Сущность первого метода заключается в измерении массы определенного количества порошка, который в свободно насыпанном состоянии полностью заполняет емкость (стакан) известного объема. Свободно насыпанное состояние получается при заполнении емкости с помощью воронки, расположенной над ней на определенном расстоянии. Отношение массы к объему представляет собой насыпную плотность. На рисунке 1.4 показана воронка с основными размерами и схема устройства.

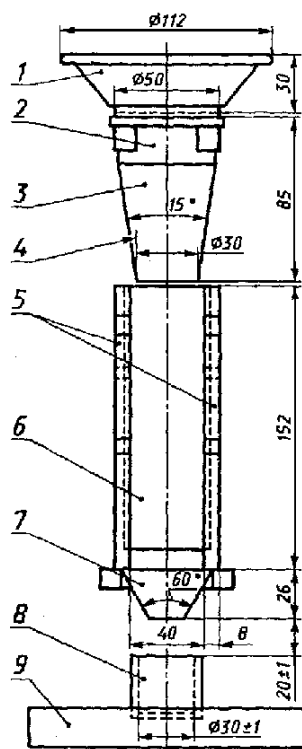


Рис. 1.5. Волюмометр Скотта
(вид спереди):
1 – большой конус воронки;

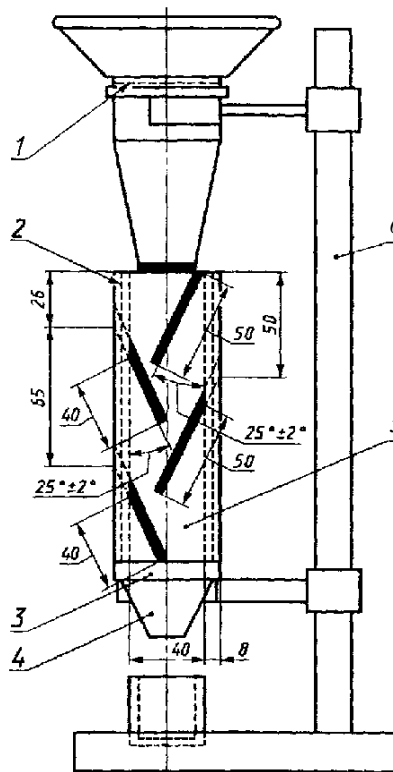


Рис. 1.6. Волюмометр Скотта
(вид сбоку):
1 – латунное сито;

2 – цилиндрическая часть воронки;	2 – сторона коробки из стекла;
3 – малый конус воронки;	3 – деталь нижнего соединения;
4 – внутренний диаметр;	4 – нижняя квадратная воронка;
5 – боковые стороны коробки;	5 – сторона коробки из дерева;
6 – передняя и задняя стороны коробки;	6 – стойка
7 – нижняя воронка;	
8 – цилиндрическая емкость;	
9 – основание прибора	

Объем емкости также регламентирован – $25 \pm 0,05 \text{ см}^3$. Емкость и воронки должны быть изготовлены из немагнитного устойчивого против коррозии металла (например, из стали марки 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632) со стенками достаточной толщины и твердости, чтобы противостоять деформации и чрезмерному износу. Внутренние поверхности емкости и воронок должны быть отшлифованы.

Процедура экспериментального определения насыпной плотности достаточно проста. Воронку с выходным отверстием диаметром 2,5 мм, закрытым сухим пальцем, заполняют порошком. После того, как воронка заполнена, открывают выходное отверстие и пропускают порошок через отверстие до полного заполнения емкости и начала пересыпания из нее порошка. Одноразовым движением с помощью немагнитной линейки выравнивают в емкости поверхность порошка, не оказывая на него давления. Массу порошка, находящегося в емкости, определяют с точностью до 0,05 г. Определение выполняют на трех испытуемых порциях. Если порошок не протекает через эту воронку, необходимо взять воронку с отверстием диаметром 5,0 мм.

Во втором методе для заполнения емкости используют волюмометр Скотта, общий вид которого показан на рис. 1.5, а на рис. 1.6 дан вид сбоку.

Боковые стороны 5 имеют размеры приблизительно $8 \times 58 \times 152 \text{ мм}$, выполнены из дерева или другого материала. Передняя и задняя стороны 6 имеют размеры приблизительно $2 \times 44 \times 142 \text{ мм}$ и выполнены из стекла. Нижняя воронка 7 имеет квадратное сечение с размерами приблизительно от 4,5 до 12,5 мм.

Большой конус воронки отделен от цилиндрической части латунным ситом с отверстиями диаметром 1,18 мм. Коробка квадратного сечения имеет четыре стеклянных наклонных пластинки, которые размещены и удерживаются с помощью пазов на противоположных (боковых) ее сторонах так, чтобы их можно было легко вынимать и чистить. Пластинки установлены таким образом, чтобы порошок последовательно падал на каждую из них, вследствие чего падение порошка прерывается, а скорость его потока уменьшается. Порядок определения насыпной плотности такой же, как и в первом методе.

1.4. СЫПУЧЕСТЬ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Под действием внешних сил частицы зернистого материала могут перемещаться относительно друг друга. Это свойство подвижности зернистого материала часто называют сыпучестью. Сыпучесть зернистого материала зависит от большого числа разных факторов: размера и формы частиц; гранулометрического состава; шероховатости их поверхности; их поверхностной влажности; степени уплотнения и т.д. [22 – 25]. Обычно оценку сыпучести порошкообразных материалов проводят при свободном истечении из бункеров (воронок) [3]. Приборы для определения сыпучести представляют собой коническую воронку с углом при вершине $60 \dots 80^\circ$ с диаметром выпускного отверстия 2,5...6 мм. На этих приборах сыпучесть определяют по массе или объему порошка, прошедшего через некоторое постоянное сечение в единицу времени. Способность сыпучего материала вытекать из отверстия также оценивают с помощью коэффициента текучести K_T , который определяют по времени истечения t материала из калиброванной воронки:

$$K_T = \frac{tr^{2,58}}{G}, \quad (1.13)$$

где r – радиус воронки в цилиндрической части, мм (согласно ГОСТ 20899–75 при определении текучести металлических порошков отверстие воронки выполняется в виде цилиндрического канала диаметром 2,5 мм и длиной 3,2 мм); G – масса порошка, засыпанного в воронку, г (по указанному стандарту $G = 50 \text{ г}$).

Практический интерес, особенно при промышленной переработке углеродных наноматериалов (УНМ), представляют результаты исследований влияния газовой дисперсионной среды и гранулометрического состава на истечение порошкообразных материалов из конической воронки [26]. Опыты проводились на порошках железа, меди и алюминия на воздухе и в вакууме при остаточном давлении $13,33 \text{ нм}^2$. Порошки имели следующие характеристики:

Железный восстановленный порошок						
Размер частиц d , мм	0,27	0,17	0,10	0,07	0,052	0,05
Насыпная плотность, г/см ³	1,55	2,00	2,27	2,33	2,43	2,07
Медный восстановленный порошок						
Размер частиц d , мм	0,47	0,27	0,17	0,10	0,07	0,05
Насыпная плотность, г/см ³	1,66	1,90	2,03	2,63	2,72	2,02
Алюминиевый порошок						
Размер частиц d , мм	0,27	0,17	0,10	0,07		
Насыпная плотность, г/см ³	1,10	1,13	1,14	1,15		

Результаты определения сыпучести порошков (расход порошка Q , см³/с) в зависимости от размера частиц (диаметр d , мм) на воздухе и в вакууме представлены на рис. 1.7.

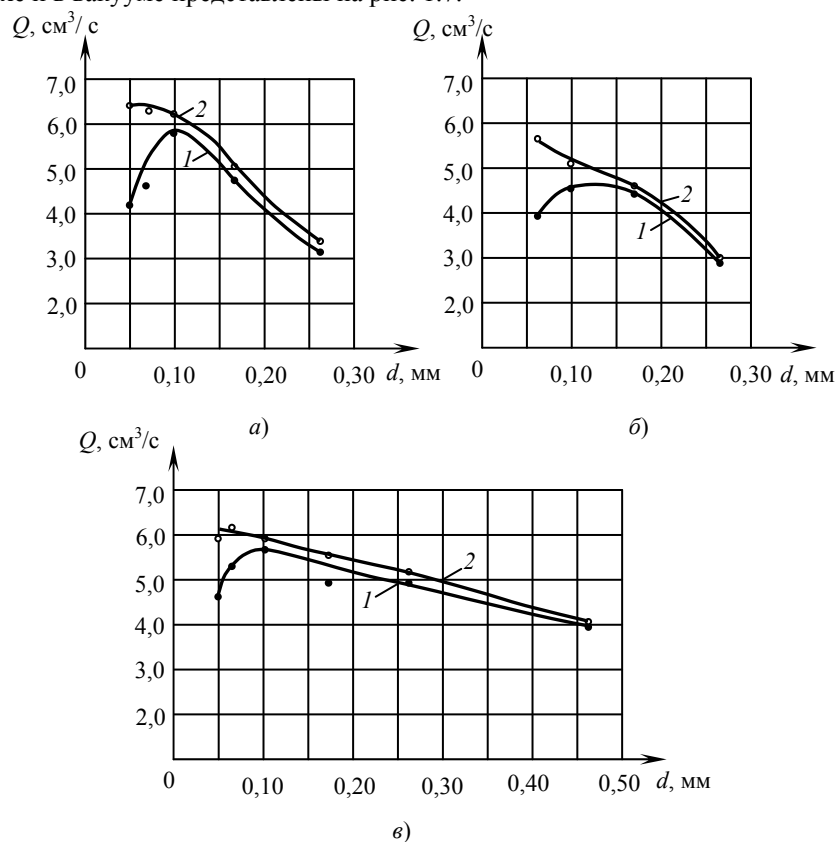


Рис. 1.7. Сыпучесть металлических порошков в зависимости от размера частиц:

a – железного, $б$ – алюминиевого, $в$ – медного; 1 – на воздухе, 2 – в вакууме

Как видно из графиков, при истечении в воздухе максимальной сыпучестью обладают порошки с размером частиц порядка 0,1 мм. В вакууме сыпучесть порошков с размерами частиц более 0,1 мм практически не изменяется, зато у порошков с размерами частиц менее 0,1 мм сыпучесть значительно увеличивается. Учитывая это, целесообразно провести аналогичные исследования с УНМ и катализатором и, в случае положительного результата, использовать данный способ увеличения текучести в промышленном производстве.

Сыпучесть зернистых материалов характеризуют также различными косвенными показателями или характеристиками [27]. Ранее всего на практике стали использовать углы естественного откоса $\alpha_{ест}$ и обрушения $\alpha_{обр}$.

1.5. УГЛЫ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ

1.5.1. УГЛЫ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА

Несмотря на то, что и размеры, и форма частиц, и насыпная плотность зернистого материала влияют на точность непрерывного весового дозирования, наиболее существенное влияние оказывают такие характеристика, как углы и коэффициенты трения. Это можно объяснить тем, что именно от коэффициентов трения в основном зависит характер движения отдельных частиц и всего материала в целом.

Существуют различные подходы к экспериментальному определению углов и коэффициентов трения [28].

Углом естественного откоса называется угол горизонтальной поверхности откоса и образующей конуса насыпанного на нее зернистого материала. Образование поверхности откоса отвечает состоянию динамического равновесия, поэтому этот угол часто называют динамическим углом α_d естественного откоса. Углом обрушения называется угол, образующийся при обрушении слоя в результате удаления подпорной стенки. Его называют также статическим углом естественного откоса. Угол обрушения $\alpha_{обр}$ всегда больше динамического угла естественного откоса $\alpha_{ест}$.

Угол естественного откоса связан с аутогезией, внутренним трением и плотностью упаковки частиц. Плотность упаковки частиц, при прочих равных условиях, зависит от высоты падения порошка при высыпании его. Поэтому при проведении измерений угла откоса конус из зернистого материала должен образовываться в результате высыпания этого материала из бункеров, расположенных на одинаковой высоте от основания устройства.

Широкое использование этого показателя в технике для определения наклона стенок при конструировании бункеров, контейнеров, воронок, течек, желобов, хранилищ объясняется простотой и наглядностью его измерения.

В лабораторной практике применяют несколько способов, различающихся между собой приемами формирования конуса и измерениями его угла. Так, например, прибор Меринга–Баранова [25] представляет собой прямой пространственный угол, образованный тремя плоскостями (см. рис. 1.8).

В ребре, образованном вертикальными стенками 4, имеется цилиндрический канал 3, ось которого совпадает с пересечением внутренних плоскостей стенок. В этот канал с помощью воронки 2 засыпается из бункера 1 анализируемый сыпучий материал. На боковые стенки 4 и дно 5 нанесены угломерные шкалы. В основание устройства вмонтированы уровень 7 и штатив (на схеме не показан) для укрепления бун кера. Вращением регулировочных винтов 6 устанавливают устройство горизонтально по уровню. Устанавливают воронку так, чтобы носик воронки был продолжением канала. Бункер располагают в 350 мм над воронкой. Выпускное отверстие бункера должно быть соосно с носиком воронки.

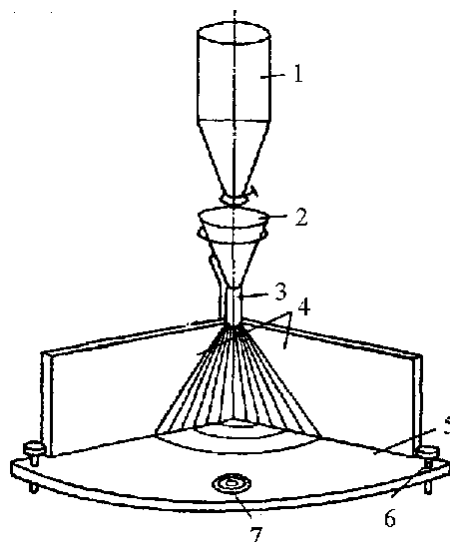


Рис. 1.8. Схема прибора Меринга–Баранова для определения динамического угла естественного откоса:

1 – бункер; 2 – воронка; 3 – цилиндрический канал;
4 – вертикальные боковые стенки; 5 – дно; 6 – винт; 7 – уровень

Подготовленную пробу зернистого материала помещают в бункер. Приоткрывают задвижку бункера так, чтобы материал тонкой струйкой высыпался в воронку, а из нее в угол устройства до тех пор, пока вершина конуса не достигнет верхнего среза стенок.

Величину динамического угла естественного откоса определяют по угломерным шкалам с точностью до 2° . За окончательный результат принимают среднее арифметическое из нескольких измерений.

Один из первых вариантов устройства определения динамического угла естественного откоса методом насыпания зернистого материала на диск показан на рис. 1.9 [29]. Устройство состоит из бункера 1 с ирисовым затвором 2, закрепленного на штанге 8, которая жестко соединена под прямым углом с основанием 5. Основание устанавливается горизонтально при помощи установочных винтов 4. Над основанием параллельно его плоскости устанавливается диск 3. На штанге закреплена линейка 7 с передвижным указателем 6.

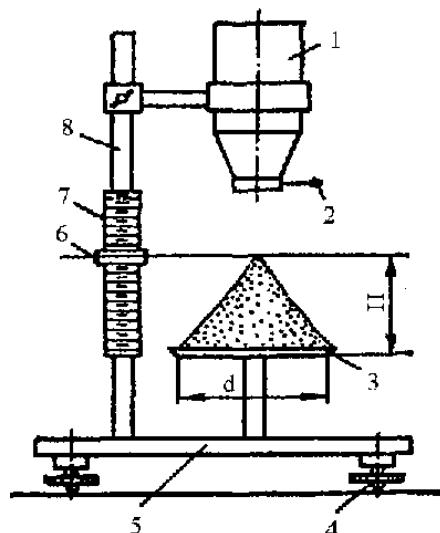


Рис. 1.9. Устройство для определения динамического угла естественного откоса:

1 – бункер; 2 – ирисовый затвор; 3 – диск; 4 – винт;
5 – основание; 6 – указатель; 7 – линейка; 8 – штанга

В исходном состоянии ирисовая диафрагма 2 на дне бункера 1 закрыта. Ползун указателя уровня 6 находится вверху штанги 8, а сам указатель сдвинут в сторону. Пробу зернистого материала засыпают в бункер. Затем приоткрывают ирисовую диафрагму так, чтобы материал начал высыпаться на середину диска. Засыпку продолжают до заполнения диска и завершения формирования конуса, т.е. до стабилизации его высоты. Закрывают отверстие диафрагмы, опускают ползун указателя уровня и измеряют высоту конуса.

Зная диаметр диска D и высоту конуса H , вычисляют динамический угол естественного откоса:

$$\alpha_d = \operatorname{arctg} \frac{2H}{D}. \quad (1.14)$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое 4 – 6 измерений.

Основной недостаток рассмотренного устройства для определения динамического угла естественного откоса заключается в том, что от высоты падения зернистого материала и скорости истечения этого материала из бункера зависит значение угла. Более того, в зоне контакта исследуемого материала с платформой или диском имеет место трение зернистого материала о поверхность из другого материала, т.е. здесь оказывает свое влияние угол внешнего трения. По всей видимости, именно эти факторы вызывают нестабильность результатов экспериментальных определений углов естественного откоса.

Все указанные недостатки устранены в устройстве, принципиальная схема которых показана на рис. 1.10 [30, 31].

В трубу 1, установленную на основании 2 в направляющих 3, засыпают порцию исследуемого материала (рис. 1.10, а). Трубу поднимают вверх и материал высыпается на основание. Излишки материала ссыпаются с основания (рис. 1.10, б). Трубу 1 опускают вниз до касания с открытой поверхностью материала (рис. 1.10, в). По шкале, которая нанесена на наружную поверхность трубы, определяют расстояние H между нижним и верхним основаниями усеченного конуса. При известных значениях диаметров D и d коэффициент внутреннего трения, численно равный тангенсу угла естественного откоса φ , рассчитывают по формуле

$$f_{\text{вст}} = \operatorname{tg} \varphi = 2H / (D - d). \quad (1.15)$$

Поскольку верхняя часть основания выполнена в виде чаши, т.е. имеет по окружности стенку с достаточно острой верхней кромкой, в нижней части конуса нет касания частиц зернистого материала с материалом основания. Основание конуса является практически идеальным кругом. Условия образования конуса материалом, высыпавшимся из цилиндра, всегда одинаковы, поскольку изначально цилиндр устанавливается на основании, а его вертикальное перемещение можно организовать с помощью электромеханического привода, т.е. можно обеспечить постоянную скорость перемещения цилиндра. Тем не менее, рассмотренное устройство имеет недостатки, и основной из них заключается в том, что образующие конуса в разных горизонтальных и вертикальных сечениях наклонены под разными углами к горизонту. Более того, момент касания нижней кромкой цилиндра открытой поверхности материала определяется исследователем, т.е. носит субъективный характер.

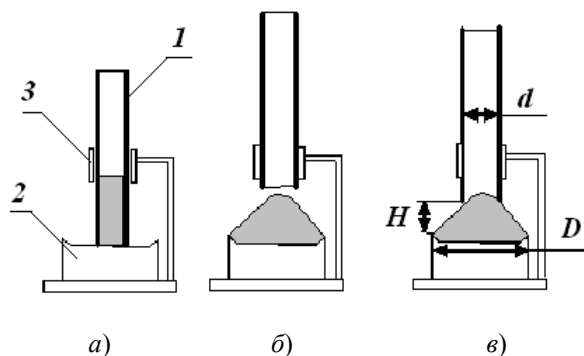


Рис. 1.10. Схема устройства и последовательность определения угла естественного откоса

Была предложена методика определения угла естественного откоса на установке, которая состоит из прибора для определения угла естественного откоса (рис. 1.11), цифровой видеокамеры и компьютера [32]. После образования конуса из зернистого материала, растровый снимок конуса с видеокамеры передается в специально разработанную программу. Исходный снимок преобразуется в черно-белое изображение, где под черным понимается материал, а под белым – его отсутствие. Дальнейшая работа происходит непосредственно с полученным черно-белым изображением.

При определении координат открытой поверхности материала использовали сканирование столбцов слева направо, а внутри столбца – сверху вниз. Как только цвет меняется, граница раздела считается определенной и координаты точки запоминаются. Сканирование текущего столбца заканчивается и начинается сканирование следующего. После определения координат точек открытой поверхности конуса программа рассчитывает уравнение образующей этого конуса $y = kx + b$ и далее угол естественного откоса $\alpha = \arg \operatorname{tg} k$.

Данная методика позволяет свести к минимуму субъективные погрешности при экспериментальном определении углов естественного откоса зернистых материалов.

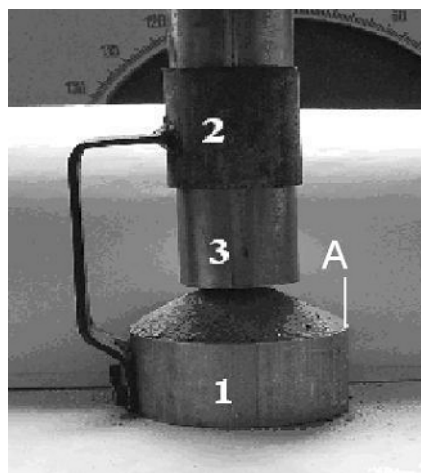


Рис. 1.11. Общий вид установки

1.5.2. УГОЛ ОБРУШЕНИЯ

Определение угла обрушения или статического угла естественного откоса заключается в измерении угла, под которым располагается боковая поверхность зернистого материала в результате его обрушения после удаления одной из стенок камеры [29]. Устройство для измерения угла обрушения (рис. 1.12) состоит из сосуда *б* и камеры *4*. Камера представляет собой параллелепипед с расположенным над ними бункером *3*. Течка бункера перекрывается задвижкой *2*.

Камера укреплена на стойках *5* при помощи хомута *11*, стержней *12* и колец *13*. Высота расположения камеры фиксируется зажимными болтами *1*.

Вращением регулировочных винтов *8* камеру устанавливают горизонтально по уровню *7*, вмонтированному в основание *9* устройства. Измерительный сосуд *б* (стеклянный или металлический) устанавливают под камерой. Сместив камеру по вертикали, устанавливают ее на сосуд. Подготовленную навеску зернистого материала, в 1,2–1,3 раза превышающую по объему измерительный сосуд, совком через щель *14* осторожно высыпают в камеру. Засыпку ведут по всей длине бункера. По окончании засыпки материала задвижку на бункере закрывают и через 4–5 минут поднимают камеру вверх. Лишний продукт в измерительном сосуде срезают линейкой вровень с кромками сосуда. После этого осторожно убирают съемную стенку *10*. Часть порошка в виде треугольной призмы сползает, при этом образуется откос.

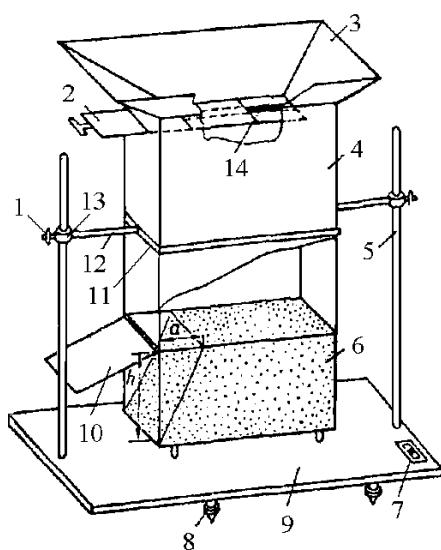


Рис. 1.12. Устройство для определения угла обрушения:

1 – болт; *2* – задвижка; *3* – бункер; *4* – камера; *5* – стойка;
6 – измерительный сосуд; *7* – уровень

Измеряют с точностью до 0,5 мм величину освободившейся верхней кромки сосуда *a* и высоту *h*. Если угол откоса четко выражен, то его величину можно измерить транспортиром. По величинам *a* и *h* статический угол естественного откоса вычисляют с помощью формулы

$$\alpha_{\text{ст}} = \arctg \frac{h}{a}. \quad (1.16)$$

За окончательный результат принимают среднее арифметическое нескольких измерений.

На практике используются также приборы, позволяющие одновременно определять углы естественного откоса и обрушения [33, 34]. Принципиальная схема показана на рис. 1.13.

Исследуемый материал засыпают в короб *1*, который на стойках *2* установлен на основании *3*. Под коробом установлен диск *4*. В исходном положении отверстие в дне короба закрыто пластиной *9*. После того, как пластину выдвигают, часть материала высыпается из короба, и образуются две поверхности обрушения. Численные значения углов обрушения определяют по угловым шкалам *10*. После высыпания из короба поток материала формируется воронкой *8* и попадает на диск *4*.

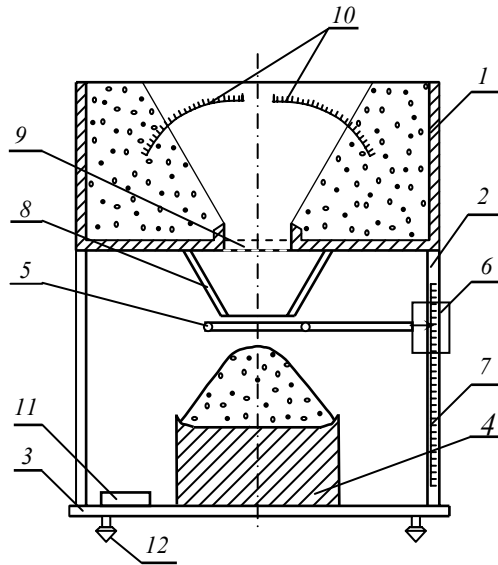


Рис. 1.13. Устройство для определения углов обрушения и естественного откоса

На диске образуется конус из материала, а излишки материала сыплются на основание 3. С помощью подвижного кольца 5 и указателя 6 по шкале 7 определяют высоту усеченного конуса и далее рассчитывают угол естественного откоса:

$$\alpha_{\text{д}} = \arctg \left(\frac{2H}{D_{\text{д}} - D_{\text{к}}} \right), \quad (1.17)$$

где H – высота усеченного конуса материала; $D_{\text{д}}$ – диаметр диска 4; $D_{\text{к}}$ – диаметр кольца 5.

Горизонтальное положение основания устанавливают с помощью регулировочных винтов 12 по уровню 11. Учитывая, что диаметры кольца 5 и диска 3 постоянны, шкалу 7 можно градуировать в градусах, чтобы исключить необходимость вычисления угла естественного откоса.

1.5.3. НАЧАЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СДВИГУ, УГОЛ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И УГОЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ СДВИГУ

Определение начального сопротивления сдвигу τ_0 , угла внутреннего трения φ и угла сопротивления сдвигу φ_{σ} можно осуществлять на приборе, схема которого показана на рис. 1.14 [29].

Прибор состоит из удлиненной коробки 1, заполненной сыпучим материалом, вдоль которой сверху может перемещаться рамка 2. Сыпучий материал, содержащийся в рамке 2, нагружается сверху набором сменных грузов 3, создающих нормальное напряжение σ в плоскости сдвига ab . На грузовую чашку 4, связанную с рамкой 2 шнуром, перекинутым через блок, устанавливают гири в количестве, достаточном для приведения в движение рамки 2.

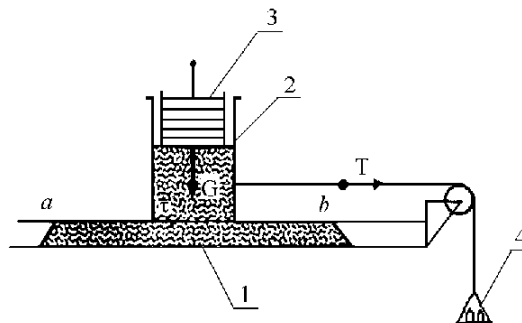


Рис. 1.14. Схема прибора для определения начального сопротивления сдвигу τ_0 , угла внутреннего трения φ и угла сопротивления сдвигу φ_{σ} :

1 – коробка со слоем материала; 2 – подвижная рамка; 3 – набор грузов; 4 – грузовая чашка

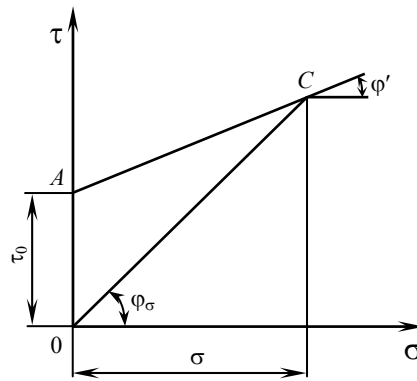


Рис. 1.15. Диаграмма напряжений $\tau = f(\sigma)$

Предельное напряжение τ определяется как частное от деления сдвигающей силы T (за вычетом собственного сопротивления рамки 2) на площадь сдвига сыпучего материала. Экспериментальные значения аппроксимируются прямой AC (рис. 1.15).

На рисунке 1.15 линия AC показывает зависимость предельных наибольших касательных напряжений τ от величины нормальных напряжений σ в сыпучем теле.

Угол наклона линии AC к оси абсцисс φ носит название угла внутреннего трения сыпучего материала, а тангенс этого угла называется коэффициентом внутреннего трения $f = \operatorname{tg}\varphi$.

Если точку C соединить с началом координат (линия OC), то угол наклона этой прямой к оси абсцисс φ_σ будет характеризовать сопротивление сыпучего материала сдвигу. Чем больше угол φ_σ , тем больше сопротивление сдвигу при данном значении нормального напряжения.

Поэтому угол φ_σ носит название угла сопротивления сдвигу, или угла внутреннего сдвига. Тангенс этого угла обозначается через f_σ и называется коэффициентом внутреннего сдвига.

Отрезок τ_0 носит название начального сопротивления сдвигу и характеризует силу сцепления частиц материала между собой.

Для одного и того же рода сыпучего материала величина τ_0 зависит от влажности продукта, размера частиц, степени уплотнения материала и от срока хранения его в неподвижном состоянии. Следует иметь в виду, что сыпучие материалы, загруженные в контейнеры или транспортные бункеры и подверженные сотрясениям, склонны к уплотнению продукта, в результате чего начальное напряжение сдвигу τ_0 может увеличиться в 3–4 раза. Особенно это относится к пылевидным материалам.

В отличие от жидкостей сыпучие материалы имеют ограниченную подвижность, которая определяется силами взаимодействия частиц в местах контактов поверхностей частиц. Эти силы зависят от природы материала, размера и формы частиц, гранулометрического состава, его влажности, удельной поверхности и давления на материал. С увеличением дисперсности и влажности частиц, а также давления возрастают и силы поверхностного сцепления между ними.

Следует отметить, что вопросы определения углов трения сыпучих материалов (СМ) и влияния на эти углы различных факторов всегда находились [1, 35–40] и находятся в центре внимания ученых и специалистов, занимающихся переработкой СМ [40–43].

1.5.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ

Любая деформация сыпучего материала сопровождается сдвигом, т.е. скольжением частиц одного слоя по частицам другого слоя. Сыпучие материалы в состоянии выдерживать определенные усилия сдвига. Деформация в них не наступает до тех пор, пока не преодолено некоторое напряжение сдвига τ_a , которое называют предельным сопротивлением сдвигу. Связь между τ_a и нормальным давлением на плоскость скольжения слоев σ_a выражается обобщенным законом Кулона:

$$\tau_a = \tau_0 + f\sigma_a, \quad (1.18)$$

где τ_0 – начальное сопротивление сдвигу; f – коэффициент внутреннего трения.

Для идеально сыпучих материалов $\tau_0 = 0$ при $\sigma_a = 0$. Для связных сыпучих материалов (которых большинство) $\tau_0 \neq 0$ при $\sigma_a = 0$.

Для определения внутреннего трения зернистого материала в соответствии с Европейским стандартом [44] мы использовали прибор Дженике, схема которого показана на рис. 1.16. Зернистый материал засыпали в секции 1–3 и выравнивали по краю верхней секции. Далее на материал через прижимную плиту 4 передавали усилие для его уплотнения, равное последующей нагрузке и 10–15 раз поворачивали прижимную плиту

вокруг вертикальной оси на угол $30 \dots 45^\circ$, добиваясь однородного уплотнения материала в секциях. После этого верхнюю секцию 1 снимали (сдвигали) вместе с материалом до верхнего уровня секции 2. На материал укладывали опорную плиту 5, на которую устанавливали гирию с определенным весом. В результате действия вертикальной нагрузки P в зернистом материале возникают определенные нормальные напряжения. Посредством винтового привода 8 на секцию 2 передавали сдвигающее усилие, величину которого фиксировали динамометром 6. В результате действия горизонтальной нагрузки G в зернистом материале возникали касательные напряжения. Величину усилия G увеличивали до тех пор, пока секция 2 не сдвинется относительно секции 1. Коэффициент внутреннего трения рассчитывали исходя из соотношений горизонтальной и вертикальной нагрузок.

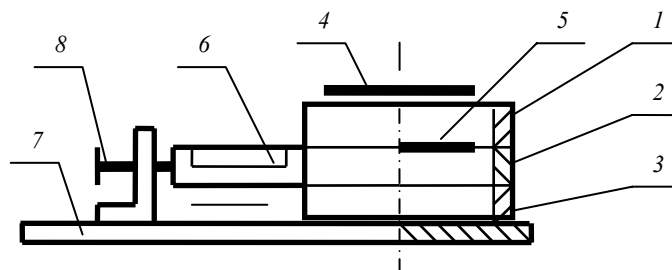


Рис. 1.16. Схема прибора для определения коэффициентов трения:
 1 – верхняя секция; 2 – сдвигаемая секция; 3 – неподвижная секция;
 4 – прижимная плита; 5 – опорная плита; 6 – измерительное устройство;
 7 – рама; 8 – винтовой привод

Следует особо отметить, что процедуры уплотнения материала и сдвига колец достаточно сложные. При выполнении данных процедур субъективный фактор играет весьма существенную роль. Так, например, экспериментальные данные по углам внутреннего трения для одного и того же сыпучего материала, полученные в 10 разных лабораториях, отличались на $5 \dots 10\%$. Очевидно, что такое расхождение в экспериментальных результатах является одной из причин разногласий между учеными по методике определения углов и коэффициентов внутреннего трения.

Если вместо нижней секции 3 установить пластину из интересующего нас материала, то можно по аналогичной методике определить коэффициент внешнего трения.

На приборе Дженике можно определять только коэффициенты трения покоя, которые характеризуют условия перехода зернистого материала от состояния покоя к движению. Все попытки определения коэффициентов трения зернистого материала при движении секции 2 относительно секции 3 оканчивались неудачами прежде всего потому, что изменяется площадь контакта между секциями, т.е. площадь сдвига, и изменяются условия силового воздействия между частицами в окрестностях плоскости сдвига.

Частично указанные недостатки устранены во вращающихся сдвиговых ячейках [45 – 47], схемы которых показаны на рис. 1.17.

Наибольший интерес представляет прибор Шульца [46], схема которого показана на рис. 1.18.

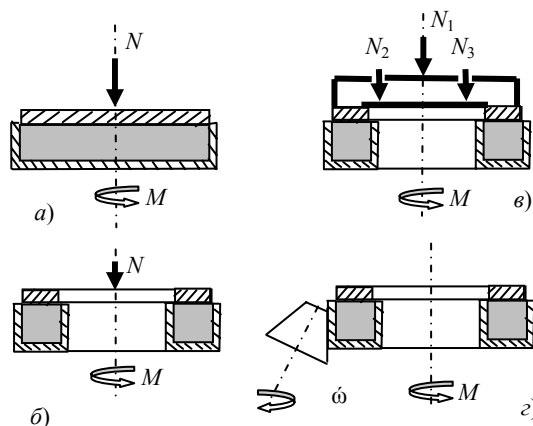


Рис. 1.17. Схемы вращающихся сдвиговых ячеек

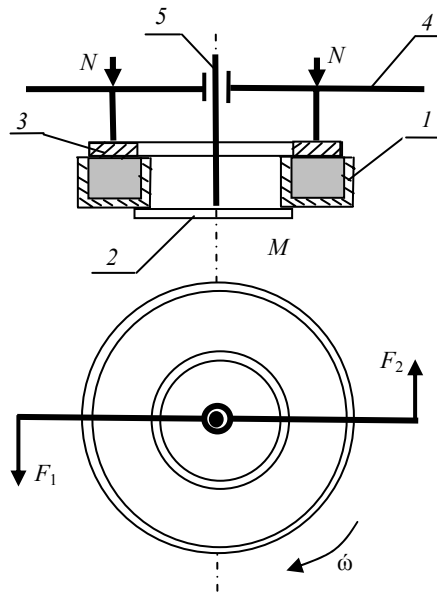


Рис. 1.18. Сдвиговый тестер Schulze

В данном приборе при перемещении верхней секции относительно нижней секции площадь сдвига не изменяется, а также не изменяются условия контакта между частицами в окрестностях плоскости сдвига. Тестер состоит из ячейки 1, установленной на основании 2, нажимной плиты 3 с коромыслом 4, которое может поворачиваться относительно оси 5. Привод (на рис. 1.18 не показан) вращает ячейку вокруг вертикальной оси. По экспериментально определенным значениям сил F_1 и F_2 рассчитываются касательные напряжения в плоскости сдвига. Устройство позволяет определять коэффициенты внутреннего трения покоя и движения, а также коэффициент внешнего трения. Несомненным преимуществом данного тестера является возможность практически полной механизации и автоматизации процедуры определения коэффициентов трения, что исключает негативное влияние субъективных факторов. Как правило, коэффициент внешнего трения меньше, чем коэффициент внутреннего трения.

Разработан целый ряд различных сдвиговых ячеек, которые учитывают специфику материалов и оборудования, на котором предполагается перерабатывать эти материалы [48 – 51].

1.5.5. УГЛЫ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ

Ранее [52] нами было предложено использовать при расчетах барабанных сушилок углы и коэффициенты трения покоя и движения [53, 54].

Углы трения покоя и движения определяли на приборе, схема которого показана на рис. 1.19 [55]. Устройство состоит из барабана 1 с загрузочным люком 2. На прозрачной торцевой стенке 7 установлен подвижный флажок 3, а на основании 6 – угловая шкала 5. Барабан приводится во вращение приводом 8. Внутри барабана установлена лопасть 4, сыпавший край которой совпадает с осью вращения барабана.

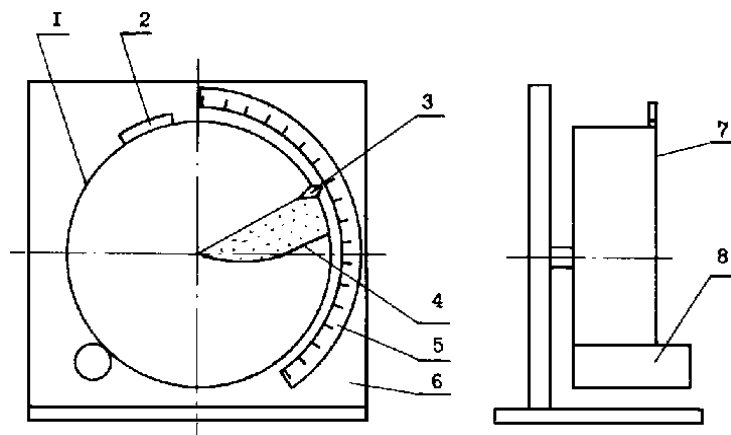


Рис. 1.19. Схема прибора для определения углов трения

Определение углов трения выполняли в следующей последовательности. Анализируемый зернистый материал засыпали в барабан *I*. Включали привод вращения барабана. После того, как барабан совершал 2-3 оборота, привод вращения выключали в тот момент, когда начиналось ссыпание зернистого материала с лопасти. По окончании ссыпания материала с лопасти фиксировали угол наклона открытой поверхности материала к горизонту – угол трения движения (α_d). Помещали флажок в точку пересечения линии открытой поверхности с обечайкой барабана и повторно включали привод барабана. Привод выключали в тот момент, когда начиналось ссыпание материала с лопасти. По положению флажка определяли угол наклона открытой поверхности материала к горизонту, при котором началось ссыпание материала. Это угол трения покоя (α_n).

При малой разнице в численных значениях углов трения движения и покоя (сухой речной песок, стеклянные шарики) определение угла трения покоя осуществляли другим способом. После определения угла трения движения α_d начинали вращать барабан с угловой скоростью, соответствующей режиму периодических обрушений, и замеряли время *t*, за которое происходит 5 обрушений материала с лопасти, после чего барабан останавливали. Угол трения покоя α_n рассчитывали по следующей формуле:

$$\alpha_n = \alpha_d + t\omega/5 . \quad (1.19)$$

В результате сравнения экспериментальных значений углов внутреннего трения с углами трения покоя и движения установлено, что наблюдается ярко выраженная взаимосвязь данных механических характеристик зернистых материалов. В то же время следует отметить, что приборы мало механизированы и автоматизированы, в результате чего большое влияние на точность измерения характеристик оказывают субъективные факторы.

При использовании прибора Дженике сложно автоматизировать процесс предварительного уплотнения зернистого материала. Поскольку установлена взаимосвязь между коэффициентами внутреннего трения и трения покоя, для организации автоматизированного эксперимента нами был выбран прибор, на котором определяются углы и коэффициенты трения покоя и движения [55], тем более, что данные коэффициенты трения можно определять и во вращающихся непрерывно лабораторных установках [56, 57]. Кроме этого, коэффициенты трения движения и покоя используются: при описании движения во вращающихся барабанах как круглого [58], так и произвольного поперечного сечения [59]; при моделировании процессов смешивания [60, 61]; гранулирования [62]; классификации [63]; дозирования [64 – 67].

Учитывая вышесказанное, была разработана программа, позволяющая сканировать снимки и определять угол наклона открытой поверхности к горизонту при начале ссыпания и завершении ссыпания зернистого материала с лопасти [68]. В основу этой программы были положены результаты исследований по использованию современных компьютерных технологий при определении углов естественного откоса и обрушения [69]. Результаты предварительных экспериментов позволили выявить недостатки данной программы и наметить пути их устранения. Тем не менее, имеется реальная возможность создать методику и аппаратно-программное обеспечение, которые позволят экспериментально определять углы трения покоя и движения зернистых материалов практически без участия исследователя. Таким образом, будет полностью исключен субъективный фактор, который влияет на точность определения механических характеристик зернистых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конструирование и расчет машин химических производств : учеб. для вузов / Ю.И. Гусев [и др.] ; под ред. Э.Э. Кольман-Иванова. – М. : Машиностроение, 1985. – 406 с.
2. Машиностроение : энциклопедия. Т. FV-12 : Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М.Б. Генералов [и др.] ; под общ. ред. М.Б. Генералова. – М. : Машиностроение. – 2004. – 832 с.
3. Генералов, М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии / М.Б. Генералов. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.
4. Анализаторы ситовые [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.baltikalab.ru/rassev.php>, свободный.
5. Пьезометрические и электростатические анализаторы размеров частиц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.labequips.ru/granuly/Pezometricheskie_i_elektrostaticheskie_analizatory, свободный.
6. Коултера прибор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diclib.com/cgi-bin/d1.cgi?l=ru&base=bse&page=showid&id=32758>, свободный.
7. Анализатор размера и количества частиц Multisizer 4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bga.su/catalog/8/33/166.html>, свободный.
8. Седиментация субмикронных частиц диоксида кремния в концентрированных суспензиях [Электронный ресурс] / О.В. Ермолаева, Э.Н. Самаров, В.М. Масалов, Е.В. Жариков, Г.А. Емельченко ; Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева ; Институт физики твердого тела РАН. – Режим доступа: http://www.crys.ras.ru/nccg/REPORT6/eov1_2.ntml, свободный.
9. Алексеев, Е.В. Использование метода весовой седиментации для экспериментального изучения стесненного осаждения частиц / Е.В. Алексеев, С.О. Дорофеев, Н.Г. Квеско // Сборник докладов VI научной

- конференции по механике летательных аппаратов и современным материалам. – Томск, 1999. – Вып. 2. – С. 89–90.
10. Алексеев, Е.В. Разработка компьютеризированного комплекса весовой седиментации частиц / Е.В. Алексеев, А.Т. Росляк, Н.Г. Квеско // Исследования по баллистике и смежным вопросам механики : сб. науч. ст. / ЦИОРАН Том. гос. ун-та. – Томск, 2002. – Вып. 5. – С. 134–135.
11. Исследование процесса седиментации угольных частиц применительно к анализу гранулометрического состава угольной пыли в шахтах / Е.В. Алексеев [и др.] // Доклады III Всероссийской научной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики". – Томск, 2002. – С. 203–204.
12. Алексеев, Е.В. Разработка компьютеризированных комплексов для проведения виртуальных лабораторных работ / Е.В. Алексеев, А.Т. Росляк, В.А. Смоловик // Открытое и дистанционное образование. – 2004. – № 2. – С. 27–33.
13. Алексеев, Е.В. Программно-измерительный комплекс анализа гранулометрического состава осадочных пород на основе седиментации частиц из стартового слоя / Е.В. Алексеев // Материалы X Международного симпозиума студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова "Проблемы геологии и освоения недр". – Томск, 2006. – С. 385–386.
14. Алексеев, Е.В. Совершенствование прибора и метода анализа гранулометрического состава порошков на основе слоевой седиментации частиц : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.07.08 ; 05.11.13 / Е.В. Алексеев. – Томск, 2006. – 17 с.
15. Автоматический экспресс-анализатор крупности частиц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lab-tex.ru/index/php?page=1245>, свободный.
16. Crystalsizer. Измерение частиц методом дифракции белого света [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.linolab.ru/Katalog_tovarov/Pribory_i_oborudovanie_zarubezhnyh_firmproizvoditeley/Retsch/Analizatory_krupnosti_chastic?ew_window=yes&product_id=46751, свободный.
17. Cinderella. Система контроля качества гранулированных удобрений на основе оптоэлектронного метода измерения геометрических характеристик гранул [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.artvision.mallenom.ru/inno_vision_expert_cinderella.php, свободный.
18. Лазерный анализатор размеров частиц "Analysette 22 NanoTec" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.neosib.ru/catalogue/fritsch/particle_sizing/analysette22.html, свободный.
19. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л. : Химия, 1974. – 280 с.
20. Першин, В.Ф. Расчет относительной плотности и координационного числа полидисперсного материала. I. Плоская задача / В.Ф. Першин // Порошковая металлургия. – 1990. – № 3. – С. 9–14.
21. Першин, В.Ф. Расчет относительной плотности и координационного числа полидисперсного материала. II. Пространственная задача / В.Ф. Першин // Порошковая металлургия. – 1990. – № 5. – С. 14–18.
22. Оцука, А. Основные свойства порошков / А. Оцука // Кагаку соти. – 1974. – Т. 16, № 7. – С. 58–67.
23. Пестов, И.Е. Физико-механические свойства зернистых и порошкообразных химических продуктов / И.Е. Пестов. – М. : Изд-во АН СССР, 1947. – 33 с.
24. Аракава, М. Свойства сыпучих тел и степень зернистости / М. Аракава // Секубай. – 1974. – Т. 16, № 3. – С. 51–58.
25. Аракава, М. Характеристики порошков и их измерения / М. Аракава // Сэрамиккусу. – 1977. – Т. 12, № 5. – С. 399–412.
26. Прокатка металлических порошков / Г.А. Виноградов [и др.]. – М. : Металлургия, 1969. – 382 с.
27. Классен, П.В. Основы техники гранулирования / П.В. Классен, И.Г. Гришаев. – М. : Химия, 1982. – 272 с.
28. Мищенко, С.В. Исследование корреляции диэлектрической и калориметрической степени отверждения углепластиков / С.В. Мищенко, О.С. Дмитриев, О.А. Дмитриев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10, № 1Б. – С. 195–200.
29. Основы технологии подготовки дисперсных материалов при переработке энергетических конденсированных систем. В 2 ч. Ч. 1. Изучение свойств и подготовка дисперсных материалов / Н.А. Симбирцев [и др.]. – М. : Эврика, 2006. – 191 с.
30. А. с. 1226000 СССР, МКИ³ G 01 B 3/56. Устройство для определения углов естественного откоса сыпучих материалов / В.Ф. Першин, Е.А. Мандрыка, А.Н. Цетович (СССР). – № 3776750/25-28 ; заявл. 30.07.84 ; опубл. 23.04.86, Бюл. № 15.
31. А. с. 1472757 СССР, МКИ³ G 01 B 11/26. Способ определения угла естественного откоса сыпучего материала / Н.М. Казанский, А.Д. Ишков, В.Ф. Першин, А.Н. Цетович, Е.А. Мандрыка (СССР). – № 4106564/25-28 ; заявл. 22.05.86 ; опубл. 15.04.89, Бюл. № 14.
32. Автоматизированное определение углов естественного откоса / А.И. Шершукова [и др.] // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2007. – Вып. 20. – С. 78–81.

33. А. с. 1295201 СССР, МКИ³ G 01 В 5/24. Устройство для измерения углов обрушения и естественного откоса / В.Ф. Першин, Е.А. Мандрыка, В.С. Молочков, А.Н. Цетович (СССР). – № 3950780/25-28 ; заявл. 10.09.85 ; опубл. 07.03.87, Бюл. № 9.
34. А. с. 136920 СССР, МКИ³ G 01 В 7/30. Устройство для измерения углов откоса и обрушения / А.Н. Цетович, А.П. Востоков, Е.А. Мандрыка, В.Ф. Першин, Н.М. Казанский (СССР). – № 4097385/25-28 ; заявл. 31.07.86 ; опубл. 30.12.87, Бюл. № 48.
35. Аоки, Р. Углы трения порошковых материалов / Р. Аоки // Кагуку когаку. – 1960. – Т. 24, № 8. – С. 598 – 600.
36. Molerus, O. Effect of interparticle cohesive forces on the flow behaviour of powder / O. Molerus // Powder Technology 20, 1978. – P. 161 – 175.
37. Зимон, А.Д. Аутогезия сыпучих материалов / А.Д. Зимон, Е.И. Андрианов. – М. : Metallurgia, 1978. – 288 с.
38. Карноушенко, Л.И. Взаимосвязь напряжения в своде с основными параметрами сыпучих материалов / Л.И. Карноушенко, Е.Г. Иоргачева // Применение аппаратов порошковой технологии и процессов термосинтеза в народном хозяйстве : материалы Всесоюз. конференции. – Томск, 1987. – С. 84–85.
39. Соколовский, В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М. : Физматгиз, 1960. – 243 с.
40. De Silva, S.R. Characterization of particulate materials – how satisfactory is the current situation? / S.R. de Silva // The 3rd Israeli Conference for conveying and handling of particulate solids. – Israeli, The Dead Sea, May 29 – June 1, 2000. – P. 3.1 – 3.15.
41. Bell, T.A. Solids flow ability measurement and interpretation in industry / T.A. Bell // The 3rd Israeli Conference for conveying and handling of particulate solids. – Israeli, The Dead Sea, May 29 – June 1, 2000. – P. 3.16 – 3.25.
42. Zetzener, H. Behaviour of bulk solids during relaxation in the biaxial shear tester / H. Zetzener, J. Schwedes // International Symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III), August 1999. – Porsgrunn, Norway. – P. 135 – 142.
43. Marjanovic, P. Determination of powder flow properties using different shear cells / P. Marjanovic, E. McGee // International Symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III), August 1999. – Porsgrunn, Norway. – P. 151 – 158.
44. Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell. The institut of chemicalengineer european federation of chemical engineering / Published by the Institution of Chemical Engineers, George E. Davis Building, 165-171 Railway Terrace, Rugby, Warwickshire, CV21 3HQ. – England, 1989. – 46 p.
45. Schulze, D. Development and application of a novel ring shear tester / D. Schulze // Aufbereitungs-technik 35 (1994) J 0. – P. 524 – 535.
46. Schulze, D. A new ring shear tester for flow ability and time consolidation measurements / D. Schulze // Proc. 1st International Particle Technology Forum, August 1994. – Denver, Colorado, USA, 1994. – P. 11 – 16.
47. Schulze, D. Aproprate devices for the measurement of flow properties for silo design and quality control / D. Schulze // PARTEC 95, Preprints "3rd Europ. Symp. Storage and Flow of Particulate Solids", 21 – 23.03.95. – Nürnberg, 1995. – P. 45 – 56.
48. Carr, J.F. An annular shear cell for granular materials / J.F. Carr, D.M. Wal-ker // Powder Technology 1 (1967/68). – P. 369 – 373.
49. Schwedes, J. Measurement of flow properties of bulk solids / J. Schwedes, D. Schulze // Powder Technology 61(1990). – P. 59 – 68.
50. Schulze, D. Zur Fließfähigkeit von Schüttgütern – Definition und Meßverfahren / D. Schulze // Chem.-Ing.-Techn. 67 (1995) 1. – P. 60 – 68.
51. Carr, R.L. Classifying flow properties of solids / R.L. Carr // Chem.-Eng. 72 (1965) 3. – P. 69 – 72.
52. Heat and mass transfers in dram dryers with blades / V. Pershin [etc.] // The 3ed Israeli Conference for conveying and handling of particulate solids. – Israeli, The Dead Sea, May 29 – June 1, 2000. – P. 7.23 – 7.27.
53. Свойства сыпучих материалов и термины / М.П. Макевнин [и др.] // Механика сыпучих материалов : тез. докл. IV Всесоюз. конф. – Одесса, 1980. – С. 6–7.
54. Першин, В.Ф. Коэффициенты трения сыпучих материалов / В.Ф. Першин, М.М. Свиридов, В.В. Черный // Сушка и грануляция продуктов микробиологии и тонкого химического синтеза : тез. докл. респ. науч. конф. – Тамбов, 1981. – С. 113–114.
55. А. с. 1083069 СССР, МКИ G 01В 5/24. Устройство для определения углов естественного откоса и обрушения сыпучих материалов / М.П. Макевнин, В.Л. Негров, В.Ф. Першин, М.М. Свиридов (СССР). – № 3531902/25-28 ; заявл. 31.12.82 ; опубл. 30.03.84, Бюл. № 12.
56. А. с. 1478101 СССР, МКИ G 01 N 19/02. Способ определения коэффициента трения движения сыпучего материала / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев (СССР). – № 4191624/25-28 ; заявл. 06.02.87 ; опубл. 07.05.89, Бюл. № 17.

57. А. с. 1430819 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ определения угла трения покоя сыпучих материалов / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев, В.Л. Негров (СССР). – № 4190913/25-28 ; заявл. 04.02.87 ; опубл. 15.10.88, Бюл. № 38.
58. Першин, В.Ф. Энергетический метод описания движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра / В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т. XXII, № 2. – С. 255 – 260.
59. Першин, В.Ф. Использование энергетического подхода при определении режимов движения сыпучего материала во вращающемся барабане / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 5. – С. 659 – 662.
60. Першин, В.Ф. Моделирование процесса смешения сыпучего материала в поперечном сечении вращающегося барабана / В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1986. – Т. XX, № 4. – С. 508 – 513.
61. Першин, В.Ф. Модель процесса смешивания сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана / В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 3. – С. 370 – 377.
62. Минаев, Г.А. Моделирование процесса гранулирования методом окатывания / Г.А. Минаев, В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. 24, № 1. – С. 91 – 97.
63. Першин, В.Ф. Моделирование процесса классификации в барабанном грохоте / В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. XXIII, № 4. – С. 499 – 505.
64. Pershin, V.F. Use of two-stages feeding for preparing bulk solids mixture / V.F. Pershin, S.V. Borishnikova // Proceeding of The First European Congress on Chemical Engineering. – Florece. – 1997. – Vol. 2. – P. 997 – 999.
65. Borishnikova, S.V. The application of two-stages technology for feeding particulate solids / S.V. Borishnikova, V.F. Pershin, A.G. Tkachev // Summaries of 12th International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praga, 1996. – Vol. 6. – P. 73.
66. Филимонов, Д.В. Использование двухстадийной технологии для дозирования плохосыпучих материалов / Д.В. Филимонов, СВ. Барышникова // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. – Вып. 8. – С. 73 – 77.
67. Осипов, А.А. Использование двухстадийной технологии для порционного дозирования сыпучего материала / А.А. Осипов, СВ. Барышникова // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2001. – Вып. 8. – С. 93 – 97.
68. Совершенствование метода автоматизированного определения углов обрушения сыпучих материалов / СВ. Першина, А.И. Шершукова, А.Б. Зобин, А.Г. Ткачев, В.Ф. Першин // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2007". – Одесса, 2007. – Т. 3 : Технические науки. – С. 92 – 94.
69. Автоматизированное определение углов трения покоя и движения сыпучих материалов / А.И. Шершукова [и др.] // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2007". – Одесса, 2007. – Т. 3 : Технические науки. – С. 94 – 97.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Дозирование зернистых материалов – это механический процесс, т.е. процесс, скорость которого определяется законами физики твердого тела [1]. Дозатор – устройство для автоматического отмеривания (дозирования) заданных массы или объема жидких или сыпучих материалов. Поскольку любой технологический процесс базируется на определенной массе исходного сырья, учете выработанной продукции, обеспечении заданного количества продукта по массе (или поддержание заданного расхода), то весы и дозаторы находят самое широкое применение в различных отраслях промышленности. По структуре рабочего цикла дозирование (взвешивание) может быть непрерывным или дискретным (порционным), а по принципу действия – объемным или весовым. Для объемного дискретного дозирования (рис. 2.1, а) характерно периодическое повторение цикла выпуска и набора дозы (порции) продукта объемом V . Дискретное весовое дозирование (рис. 2.1, в) основано на отмеривании дозы массой M . При объемном непрерывном дозировании (рис. 2.1, б) формируется поток с массовым расходом. При непрерывном весовом дозировании (рис. 2.1, г) поток материала, выходящий из питателя 4, непрерывно взвешивается. В зависимости от результатов взвешивания автоматически с помощью регулятора 8 и задвижки 2 с исполнительным механизмом корректируется производительность питателя. При электронном дискретном взвешивании (рис. 2.1, д) ковш с взвешиваемым материалом закрепляется на чувствительном элементе (балке), на котором наклеивают преобразователи (чаще всего тензодатчики 10). Для повышения чувствительности тензодатчики, как правило, соединяются по мостовой схеме (рис. 2.1, е). Сигнал о рассогласовании "моста" подается на прибор 11, по показаниям которого можно судить о массе продукта, находящейся в ковше. Если соединить датчики с каким-либо воспринимающим вес элементом 3 движущегося потока, то измерение величины производительности можно осуществлять непрерывно (рис. 2.1, ж).

У автоматических весовых дозаторов дискретного действия для фасовки наименьшие пределы взвешивания устанавливаются техническими условиями, а автоматических весов и дозаторов непрерывного действия в зависимости от класса точности должны составлять: для классов 0,5; 1; 1,5 – 50 %; для классов 2; 2,5; 4 – 30 % от наибольшего предела производительности (табл. 2.1).

Под точностью понимают свойство дозаторов давать показание (осуществлять дозирование), близкое к истинной массе (производительности). Количественно точность оценивается допускаемой погрешностью.

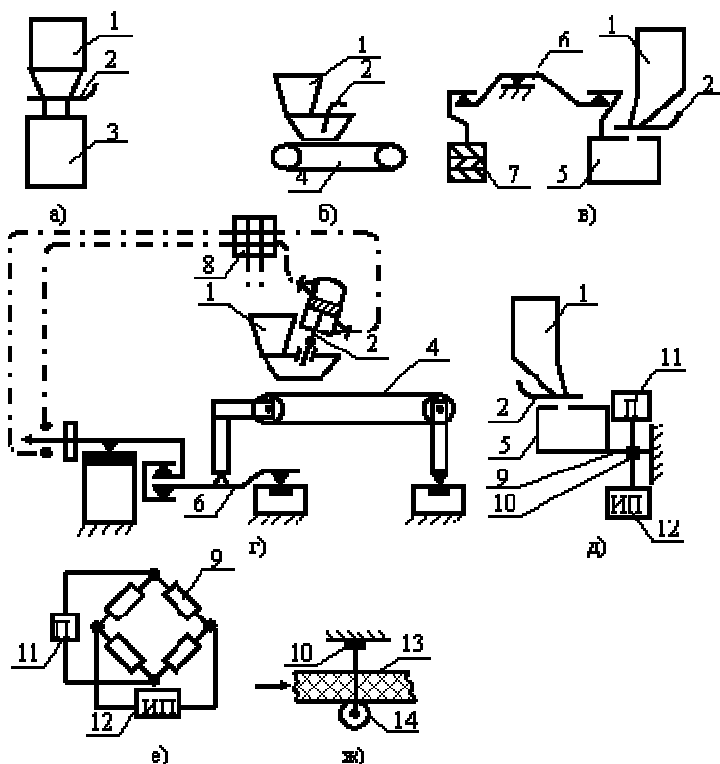


Рис. 2.1. Схемы дозирования зернистых материалов:

- a – дискретное объемное; b – непрерывное объемное;
 v – дискретное весовое; z – непрерывное весовое; d – электронное;
 e – мостовая схема соединения тензодатчиков;
 1 – бункер с материалом; 2 – задвижка; 3 – мерная камера; 4 – объемный дозатор непрерывного действия; 5 – ковш; 6 – весовой механизм;
 7 – гиредержатель; 8 – автоматический регулятор производительности;
 9 – чувствительный элемент (балка); 10 – тензодатчик;
 11 – показывающий прибор; 12 – источник питания; 13 – лента конвейера;
 14 – элемент, воспринимающий вес движущегося потока (ролик)

2.1. Наибольшие пределы взвешивания весов и дозаторов непрерывного действия

Единица измерения	Наибольшие пределы производительности									
	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800
г/ч	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800
кг/ч	1	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8
	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800
т/ч	1	1,25	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8
	10	12,5	16	20	25	32	40	50	63	80
	100	125	160	200	250	320	400	500	630	800
	1000	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000

Классы точности технологических дозаторов определяются в зависимости от типа: у автоматических весовых дозаторов дискретного действия для дозирования (фасовки) в интервале от наименьшего до половины наибольшего предела дозирования – по относительной допускаемой погрешности каждой дозы в процентах от половины наибольшего предела дозирования; в интервале от половины до наибольшего предела дозирования – по относительной допускаемой погрешности в процентах от номинального значения массы дозы (кроме того, погрешность среднего арифметического значения 10 доз не должна превышать погрешности отдельной i -й дозы, деленной на определенный коэффициент); у дозаторов непрерывного действия в установленных пределах производительности – по относительной допускаемой погрешности в процентах от наибольшего предела производительности.

2.2. ОБОБЩЕННАЯ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ВЕСОВЫХ ДОЗАТОРОВ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Анализ конструкций весовых дозаторов показал, что с точки зрения функционального назначения, можно выделить следующие основные элементы (рис. 2.2): питатель 1 ; измерительная система 2 ; управляющая система 3 .

Питатель объемного принципа действия формирует отдельную порцию или непрерывный поток из дозируемого материала с определенной объемной производительностью. Измерительная система 2 фиксирует силовое воздействие со стороны отдельной порции или непрерывного потока, преобразует эту информацию, регистрирует и передает полученную информацию на управляющую систему 3 .

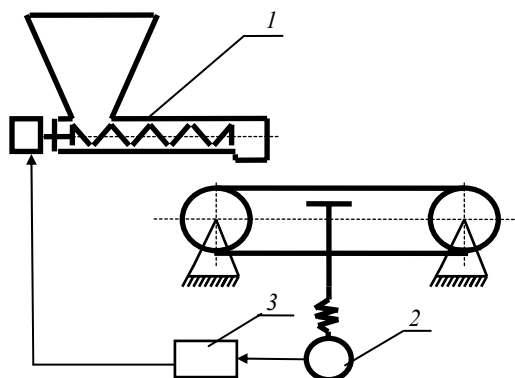


Рис. 2.2. Функциональная схема весового дозатора

Управляющая система обрабатывает информацию, преобразует ее в весовую производительность и сравнивает с заданным значением производительности. При необходимости подается управляющий сигнал на питатель 1 о прекращении работы или об изменении его объемной производительности. Рассмотрим более подробно основные составляющие весовых дозаторов.

2.2.1. ПИТАТЕЛИ

Для формирования непрерывного потока используются различные конструкции объемных питателей. На рис. 2.3 даны схемы некоторых типов питателей объемного принципа действия.

Клапанный питатель (рис. 2.3, а) представляет собой питатель со свободным падением материала. Материал высыпается из выгрузочного отверстия под действием собственного веса и под давлением столба материала в бункер. Поперечное сечение отверстия может также постоянно регулироваться запорным клапаном с использованием предкрылка определенными ступенями (грубый/тонкий поток). Исходя из этого, используются клапанные питатели, у которых посредством регулируемого дроссельного клапана можно также редуцировать грубый поток материала. Для уменьшения высоты наполнения бункера можно изготовить выгрузочное отверстие в виде решетки или сита. Далее существует возможность уменьшить влияние высоты наполнения на точность дозирования посредством ступенчатых вкладышей. Клапанный питатель подходит для свободно текущих дозируемых продуктов, таких как гранулированные материалы, зерно, бобовые, ограниченно также для соли и сахара. Основное применение клапанные дозаторы находят при загрузке последовательно соединенных дозирующих механизмов, которые, в свою очередь, могут работать в режиме дозирования по объему или по весу.

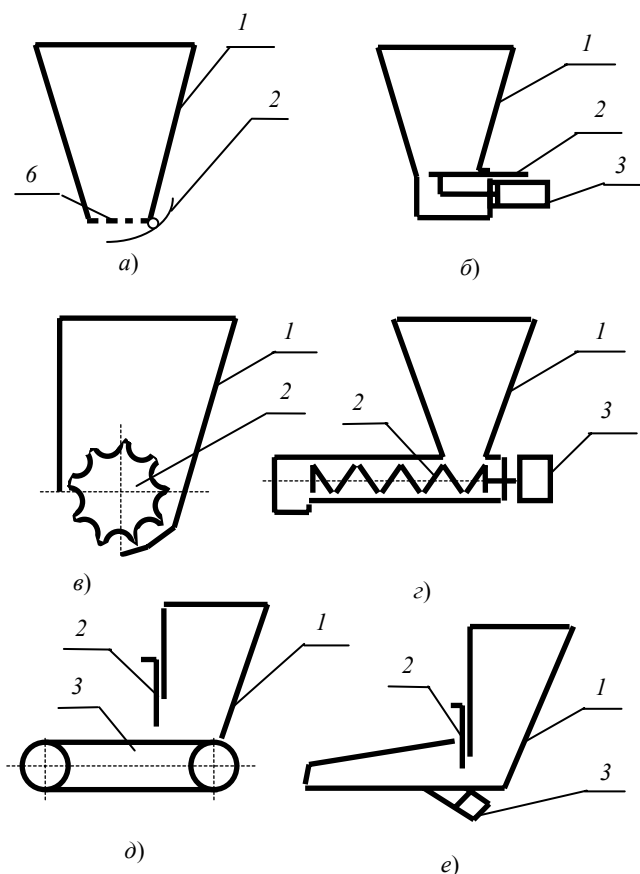


Рис. 2.3. Схемы питателей для непрерывной подачи зернистых материалов

Питатели с заслонкой или шибером (рис. 2.3, б) представляют другой вид конструкции дозатора со свободным падением материала, с такими же характеристиками и областями использования, как у клапанных дозаторов. В этих конструкциях возможны более плавное регулирование производительности, механизация и автоматизация перемещения шибера.

Питатели с валом или секторные (рис. 2.3, в), при больших размерах камер называемые также шлюзовыми барабанными питателями, характеризуются более высокой точностью дозирования. Посредством изменения формы и размера ячеек барабана можно приспособлять этот тип дозатора к различным материалам. Питатели с валом, прежде всего, находят применение в сочетании с клапанными питателями грубого потока. Они оказываются малоприменимыми для дозирования материалов, чувствительных к смятию или ломки. Варианты

питателей с валом и методы их расчета достаточно подробно описаны в технической и научной литературе [2 – 5].

Шнековые питатели (рис. 2.3, *з*) изготавливаются во множестве вариантов и отличаются большой приспособляемостью к различным задачам дозирования. Производительность определяется диаметром и числом оборотов шнека, посредством шага шнека также можно влиять на производительность и точность дозирования. Комбинация этих параметров должна осуществляться с учетом характеристик текучести дозируемого материала, хотя с увеличением диаметра шнека точность дозирования падает. Питатели с двумя шнеками и отдельными приводами могут сочетать высокую производительность с высокой точностью. Шнековые питатели пригодны, прежде всего, для неклеящих, порошкообразных материалов. Для очень клейких продуктов разработаны специальные модели дозаторов и среди них такие, как спиральные шнеки или друг друга "пронизывающие", самоочищающиеся двойные шнеки. Улучшение наполнения шнеков при дозировании сводообразующих продуктов может достигаться посредством разрыхляющих валов в бункере. Для уплотнения воздухосодержащих загружаемых продуктов разработаны шнековые упаковщики и методики их расчета [6 – 8]. Для дозирования материалов, чувствительных к смятию и ломким, шнеки пригодны только в ограниченной степени,

В ленточных питателях (рис. 2.3, *д*) материал выгружается из бункера, у которого на передней стенке установлена заслонка, регулирующая поперечное сечение потока. Кроме этого, производительность может изменяться в зависимости от скорости ленты. Ленточные питатели не имеют ярко выраженной границы выгрузки. Материал проходит через изгиб ленты на барабане, в результате чего на точность дозирования сильно влияют характеристики текучести. Точность часто является недостаточной при непрерывной подаче крупнокусковых, пластичных или волокнистых материалов. Ленточные питатели пригодны практически для всех зернистых материалов. Особо следует отметить, что с помощью питателей этого типа можно хорошо дозировать материалы, чувствительные к механическим воздействиям.

В вибрационных питателях (рис. 2.3, *е*) на материал дополнительно воздействуют вибрацией. Под воздействием вибрации существенно уменьшается коэффициент внутреннего трения, что способствует лучшему истеканию материала из бункера. Производительность регулируется амплитудой и частотой вибрации, а также размерами и конструктивными особенностями вибрирующего элемента. Незначительность механических нагрузок на материал делают вибрационные питатели пригодными для организации непрерывной подачи практически всех зернистых материалов. Точность дозирования, правда, в пределах сравнительно небольшой области регулировки массового потока является удовлетворительной почти для всех продуктов.

2.2.2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

Функциональная внутренняя структура измерительной системы весового дозатора [9] показана на рис. 2.4. Информация, которую мы хотим получить от измеряемого объекта, не всегда имеет форму активной информации. В тех случаях, когда измеряемая величина не является активной, необходимо воспользоваться источником возбуждения, который будет оказывать воздействие на измеряемый объект. Тогда отклик объекта (вместе с самим воздействием) будет содержать желаемую информацию. Если же измеряемый объект сам порождает сигнал, уже содержащий желаемую информацию, то во внешнем возбуждении нет надобности.

Часто параметр или переменная величина, подлежащая измерению, имеет электрическую природу. Когда нужно измерить неэлектрические параметры или переменные, такие как жесткость, тепловое сопротивление, смещение и т.д., чаще всего применяется того или иного рода датчик или преобразователь, и система в целом не остается чисто механической или тепловой измерительной системой. В датчике входной параметр или переменная трансформируются в электрический выходной сигнал, который несет информацию об исходной измеряемой величине. Большим достоинством такого преобразования в электрический сигнал является тот факт, что оно дает возможность в дальнейшем обрабатывать информацию с помощью электроники, а это совсем не дорогой и гибкий способ обработки. Например, в таком виде информацию легко передавать на большие расстояния при минимальном мешающем действии окружающей среды. Особенно полезно это для измерения в недоступных местах или в агрессивной среде, а также при измерении большого числа объектов, которые разнесены далеко друг от друга (например, измерения производительности нескольких дозаторов в пищевой или химической промышленности).

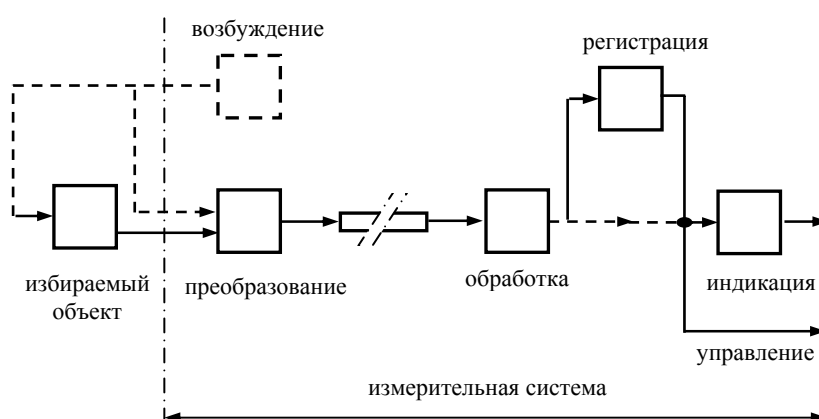


Рис. 2.4. Обобщенная внутренняя структура измерительной системы

Иногда передача информации осуществляется другими, неэлектрическими средствами. В некоторых отраслях обрабатывающей промышленности, где имеют дело с воспламеняющимися веществами, для передачи информации применяют пневматическую телеметрию. Данные измерений в этом случае передаются по тонким трубкам посредством давления газа.

Как правило, электрический сигнал на выходе датчика не пригоден для того, чтобы быть непосредственно представленным наблюдателю. Часто бывает необходимо сначала подвергнуть его обработке того или иного вида (усилению, фильтрации, коррекции нелинейности датчика и др.).

После такой обработки сигнал может быть представлен оператору или механическому наблюдателю (автомату). Выходной сигнал можно также временно сохранить в памяти и воспользоваться им позднее. В этом случае говорят о регистрации результата измерения.

Не во всякой измерительной системе имеются все шесть подсистем, указанных на рис. 2.4. Подсистемы не обязательно должны следовать в том порядке, как указано в примере. Часто, например, обработка сигнала производится до его передачи.

Сигнал, который поступает с датчика – это энергетическое физическое явление, несущее информацию. Предполагается, что такой сигнал относится к соответствующей области физики или к ее определенному разделу. Например, механический, тепловой, электрический и магнитный сигналы принадлежат каждый к своей собственной соответственной физической области. Чтобы обеспечить перенос из одной физической области в другую, должна существовать возможность отображать сигналы из одной физической области на сигналы из другой области. Такое отображение осуществляют "преобразователи", которые способны энергетическое физическое явление одного рода (из одной области) преобразовывать в явление другого рода (в другой области). При преобразовании должна сохраняться информация, содержащаяся в исходном энергетическом явлении. Такие сохраняющие информацию энергетические преобразователи называют измерительными датчиками.

Кроме отображения сигналов, принадлежащих различным областям, друг на друга, необходимо также иметь возможность отображать друг на друга сигналы из одной и той же области. В этом случае энергетическое явление преобразуется в подобное ему энергетическое явление с сохранением соответствующей информации, содержащейся в исходном явлении. Может понадобиться увеличить мощность явления (усиление мощности) или опустить какую-то ненужную информацию (фильтрация). Происходящие в веществе физические эффекты, используемые для отображения сигналов из различных областей, называют эффектами переноса, тогда как для отображения сигналов в пределах одной области используются происходящие в веществе эффекты, называемые прямыми. Вот примеры эффектов переноса: из электрической области в тепловую – эффект Пельтье; из тепловой области в электрическую – эффект Зеебека; из магнитной области в электрическую – эффект Холла. Примеры прямых эффектов, происходящих в веществе: в электрической области – электрическое сопротивление; в механической области – упругость.

С точки зрения преобразования энергии различают два типа датчиков: пассивные и активные.

Пассивными являются такие датчики, которые функционируют без потребления энергии от вспомогательного источника (см. рис. 2.5, а). Средняя мощность сигнала на выходе P_0 является частью средней мощности P_i , отдаваемой измеряемым объектом. Однако физически реализуемое преобразование энергии всегда сопровождается потерями (мощности P_l), поэтому:

$$P_i = P_0 + P_l. \quad (2.1)$$

Возможно, в принципе, накопление энергии в датчике на короткое время. Следовательно, приведенное выше соотношение справедливо только для значений, являющихся результатом усреднения на протяженном интервале времени. Когда измеряемый объект нельзя сильно нагружать, т.е. он может отдавать лишь очень малую входную мощность, существенным становится коэффициент полезного действия (КПД) η пассивного датчика:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_i - P_l}{P_i} = 1 - \frac{P_l}{P_i}. \quad (2.2)$$

Когда на входе имеется большая мощность, КПД процесса преобразования не является определяющим параметром. Все механические вольтметры, амперметры и ваттметры являются примерами этого класса пассивных датчиков. В них электрическая энергия преобразуется в механическую энергию в форме потенциальной энергии сжатой пружины подвижной системы измерительного прибора.

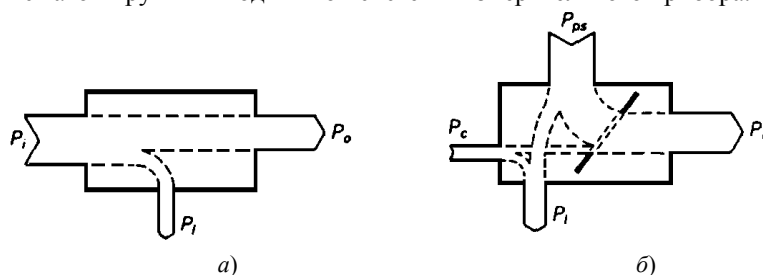


Рис. 2.5. Пассивный (а) и активный (б) датчики:

P_i – мощность на входе; P_o – мощность на выходе; P_l – мощность, которая теряется в процессе преобразования; P_c – мощность управляющего воздействия; P_{ps} – мощность вспомогательного источника

Активными являются датчики, которым требуется вспомогательный источник питания (см. рис. 2.5, б). Выходная мощность датчика P_o почти полностью берется из этого вспомогательного источника питания, отдающего мощность P_{ps} . Мощность, которую отдает измеряемый объект, практически равна нулю. Требуется лишь совсем малая мощность P_c , чтобы управлять выходной мощностью датчика (на рис. 2.5, б этот процесс преобразования схематически изображен в виде заслонки). Подавая мощность от вспомогательного источника, можно реализовать датчики с усилением, обладающие очень высокой чувствительностью.

Во многих измерительных системах используются датчики, преобразующие неэлектрические сигналы в электрические, поскольку обработка и передача сигналов в электрической области сравнительно просты. Учитывая это, рассмотрим датчики, которые отображают сигналы из различных физических областей на сигналы в электрической области, а также обратные преобразователи, которые переводят электрический сигнал в неэлектрическую величину. Датчики первой категории нужны на входе измерительной системы, поэтому они называются входными, или измерительными датчиками. Обратные преобразователи нужны на выходе измерительной системы для целей индикации и регистрации данных или для управления другими процессами, поэтому их называют выходными датчиками, или исполнительными механизмами.

К сожалению, не существует единой терминологии в мире датчиков. Их называют по-разному: сенсор, чувствительный элемент, измерительный преобразователь (transducer, sensor, pick-up, gauge). Классификацию датчиков часто производят по той величине, которая измеряется с их помощью (датчик смещения, акселерометр, тензодатчик и т.д.), или по принципу действия (емкостной датчик смещения, пьезоэлектрический акселерометр, резистивный тензодатчик и т.д.).

Устройство, предназначенное для представления результатов измерения человеку-наблюдателю, называют устройством индикации (дисплеем). Устройства индикации не обязательно должны быть аналоговыми (как, например, электронный луч, рисующий на экране осциллографа), они могут также быть цифровыми (например, алфавитно-цифровой дисплей или светящиеся элементы индикации). Устройства индикации рассчитаны на визуальное наблюдение и потому являются электрооптическими преобразователями. Чтобы избежать больших ошибок считывания и интерпретации, аналоговые устройства индикации должны быть особенно хорошо согласованы с потребностями наблюдения. Эта проблема решается, в частности, путем применения гибридных устройств индикации. Например, в осциллографе тем же электронным лучом, который рисует форму сигнала, можно отобразить на экране такую информацию, как чувствительность, масштаб по оси времени и другую. Важно осуществить сопряжение цифрового устройства индикации с наблюдателем, чтобы наблюдение не было утомительным и по этой причине не допускались промахи (нужно минимизировать блики, обеспечить высокую контрастность, использовать приятные цвета, четкие и разборчивые символы и т.д.).

Данные регистрируются для того, чтобы они были доступны позднее, например, для представления наблюдателю в более удобное время. К регистрации часто прибегают в тех случаях, когда собирается большое число результатов измерений и нужно облегчить производимый вслед за этим анализ полученных результатов. Другим поводом для регистрации данных служит желание предотвратить необходимость повторения

измерений (в частности, когда опыты крайне дороги, например, эксперименты по столкновению частиц). Для того, чтобы облегчить интерпретацию результатов измерений, часто осуществляют графическую запись. Примерами таких записей являются $x-t$ и $x-y$ диаграммы, а также графики в полярных координатах. При таком способе регистрации результатов измерений раскрываются их структура и соотношение между ними, благодаря чему интерпретация упрощается. Например, производительность (Q) весового дозатора непрерывного действия регистрируется в форме графика в координатах $Q-t$. В таком виде специалисту легко определить характер и величину отклонений производительности от среднего или заданного значения. Данные можно регистрировать в аналоговом или цифровом виде; например, графическая запись осуществляется самописцем, возможна магнитная запись на ленту.

2.2.3. УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Часто результат измерения не регистрируется и не воспроизводится средством индикации, а непосредственно используется для управления каким-то процессом. Целью управления процессом является такое регулирование, при котором выходной продукт соответствует определенным требованиям. Измеряются один или большее число параметров процесса, и регулирование осуществляется таким образом, чтобы уменьшить различие между измеряемыми величинами и заданными предварительными значениями. Если управление основано на измерении такого параметра процесса, на котором не отражается результирующее изменение характеристик процесса, то считается, что регулирование процесса осуществляется по принципу автоматического управления "вперед" (разомкнутая система управления). Однако в том случае, когда управление базируется на измерениях, результаты которых зависят от предшествующих управляющих воздействий, возникает замкнутый контур (который в отдельных случаях, в принципе, может приводить к неустойчивости). Этот метод управления процессом носит название управления с обратной связью. В настоящее время в весовых дозаторах в качестве управляющей системы обычно используют так называемые контроллеры. Контроллер – это микропроцессор, выполняющий целый ряд функций, например усиление сигнала, поступающего с измерительной системы, преобразование данного сигнала в вес отдельной порции или весовую производительность, индикацию и регистрацию веса или производительности, сравнение с заданными значениями, вычисление и подача управляющего сигнала на питатель. В частности, в дозаторе ДВЛ используется контроллер СД-01 или Simatic C7-633 ("Siemens", Германия) [10]. Сигналы весовых нагрузок на ленту и скорости ее движения обрабатываются системой измерения, управления и регулирования. Постоянное сравнение фактического значения массового расхода с заданным значением позволяет определить отклонения. По величине отклонений рассчитывается управляющий сигнал для регулирования скорости движения конвейерной ленты, что обеспечивает поддержание требуемого расхода материала. Контроллер обеспечивает: автоматическую настройку диапазона взвешивания; задание производительности; измерение скорости транспортной ленты с учетом "проскальзывания" по сигналам датчиков вращения ведомого/ведущего валов транспортера; вычисление значения текущей производительности; вычисление и суммирование количества массы материала за заданный интервал времени; индикацию параметров на ЖКИ (4×20 символов); выдачу информации на устройство термопечати; обработку входных сигналов и управление электроприводом транспортера; преобразование входных сигналов ДСТ в значения веса материала; контроль блокировок аварийных ситуаций. Управление электроприводом транспортера осуществляется с помощью преобразователя частоты MICROMASTER Vector производства фирмы Siemens [11].

2.3. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ

Как отмечалось выше, различают дискретное и непрерывное весовое дозирование.

Дискретное или порционное весовое дозирование обычно осуществляется следующим образом. В емкость I (см. рис. 2.6), установленную на весоизмерительной платформе 2, с помощью питателя 3 подается сыпучий материал.

Сигнал с датчика веса подается на контроллер 4 и сравнивается с заданной величиной. Когда вес сыпучего материала, находящегося в емкости I , достигнет требуемого значения, контроллер 4 подает управляющий сигнал на привод питателя 3 и подача материала прекращается. Порция материала выгружается из емкости I и операция взвешивания повторяется.

Достаточно широко используются ленточные весы, т.е. ленточный транспортер, установленный на весовую платформу. На рисунке 2.7 показана типовая схема ленточных весов. Материал шнековым питателем I непрерывным потоком подается на движущуюся ленту 2 транспортера, который установлен на весовую платформу 3. Вес материала P_m , находящегося на ленте, рассчитывают как разность общего веса P , который фиксируется весовой платформой, и веса транспортера P_t , т.е.:

$$P_m = P - P_t. \quad (2.3)$$

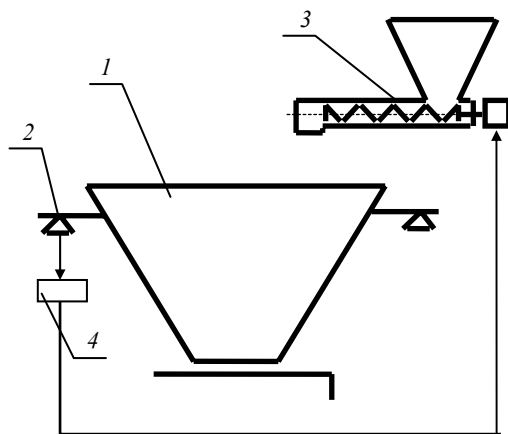


Рис. 2.6. Схема порционного весового дозатора

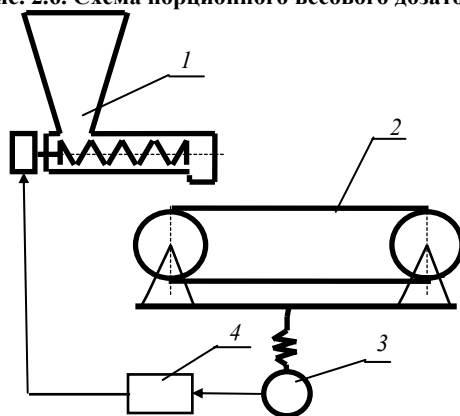


Рис. 2.7. Схема ленточных весов

В предположении, что материал распределен на ленте равномерно, рассчитывают вес материала p_m , приходящийся на единицу длины ленты и далее определяют весовую производительность дозатора Q по следующим формулам:

$$p_m = P_m / L, \quad (2.4)$$

$$Q = p_m v, \quad (2.5)$$

где L – длина участка транспортной ленты, загруженного материалом; v – скорость движения ленты.

После того, как суммарный вес материала, прошедшего через ленточный транспортер, достигает заданного значения, контроллер 4 подает управляющий сигнал на выключение привода шнекового питателя 1. Данный способ позволяет определить только среднюю производительность \bar{Q} за интервал времени $\Delta t = L/v$. Попытки определения весовой производительности за меньший интервал времени неизбежно приводят к погрешностям. Следует отметить, что расчет осуществляется в предположении определения веса материала, находящегося на ленте транспортера, без погрешностей. В действительности погрешности в определении веса могут быть весьма существенными, особенно при малых производительностях. Как показал анализ ленточных дозаторов с производительностью менее 10 килограммов в час, выпускаемых ведущими мировыми производителями, вес ленточного транспортера в десятки раз превышает вес материала, находящегося на ленте. Таким образом, точность в определении веса материала в десятки раз ниже точности в определении общего веса, который фиксируется весовой платформой. Например, при максимальной производительности 31 гс^{-1} вес транспортера с приводом около 3 кг. Абсолютная точность весовой платформы с максимальной производительностью 3000 г составляет 1 г (модель BL3 фирмы "SARTORIUS" [12]). Относительная погрешность составляет 0,033 %. Максимальный вес материала на ленте (при минимальной скорости движения ленты) составляет 60 г, следовательно, при дискретности в определении веса 1 г относительная погрешность определения веса материала составляет 1,1 %.

Таким образом, данный способ весового непрерывного дозирования зернистого материала позволяет определять и регулировать производительность только за интервалы времени, кратные продолжительности пребывания материала на транспортной ленте. Не случайно эти дозаторы часто называют ленточными весами и рекомендуют использовать для контроля суммарного веса материала за достаточно продолжительные интервалы времени.

Известны сотни конструкций дозаторов, в которых реализуются разные способы весового непрерывного дозирования зернистых материалов. Тем не менее, по способу получения информации для расчета весовой производительности весовые дозаторы непрерывного действия условно можно разделить на три большие группы:

- взвешивание определенной части непрерывного потока материала, находящегося в дозаторе;
- взвешивание материала, оставшегося в бункере (технология Loss-in-weight);
- взвешивание определенной части потока на выходе из дозатора.

Первый способ, как правило, реализуется в ленточных дозаторах. На рисунке 2.8 показаны типовые схемы ленточных весовых дозаторов. В устройстве, изображенном на рис. 2.8, *а*, под лентой расположены два опорных ролика 5 и весоизмерительный ролик 4, который воздействует на весоизмерительный датчик 2. С датчика 2 сигнал поступает на контроллер 3, который, сравнивая его с заданной величиной, формирует и выдает управляющий сигнал на питатель 1.

В данном устройстве взвешивается та часть сыпучего материала, которая расположена между опорными роликами, и, следовательно, управляющий сигнал на увеличение или уменьшение производительности дозатора дается исходя из веса этого участка. Следует отметить, что тарировка данного устройства производится исходя из предположения, что сыпучий материал на ленте расположен равномерно, добиться чего фактически невозможно. Очевидно, что на весоизмерительный ролик будет оказывать воздействие не только этот вес, но и вес материала, находящегося вне зоны взвешивания, за счет изменения натяжения ленты транспортера, а следовательно, возможен ложный сигнал на изменение производительности питателя. Кроме того, подобным же образом будет действовать и динамическое воздействие от привода транспортера, динамическое воздействие от трения ленты о ролик и т.д. Все это в конечном итоге приводит к тому, что на выходе дозатора поток будет неравномерным.

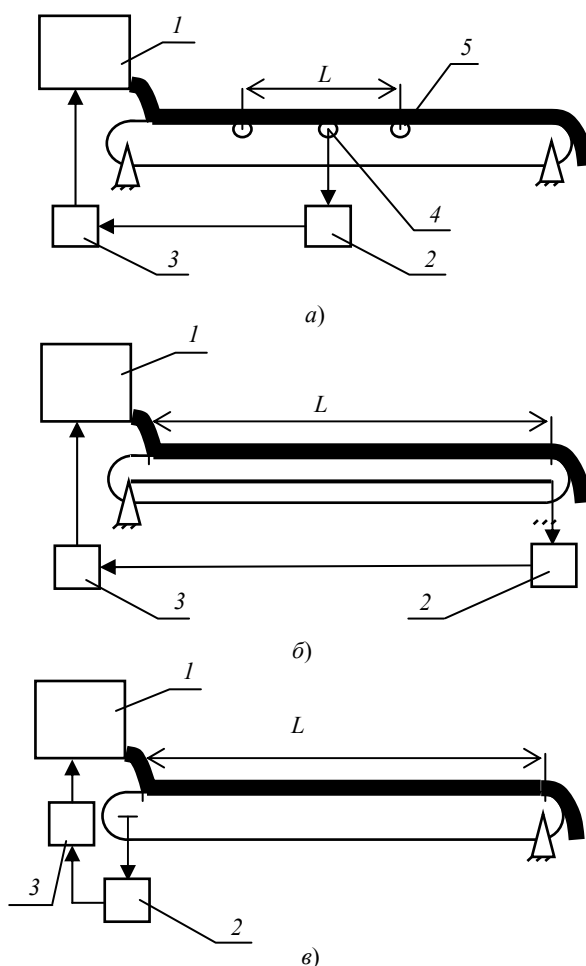


Рис. 2.8. Схемы ленточных дозаторов непрерывного действия

В устройстве, изображенном на рис. 2.8, *б*, разгрузочный край ленточного транспортера расположен на весоизмерительной платформе. В данном случае на весоизмерительный датчик действует не только вес сыпучего материала, расположенного на транспортере, но и вес ленточного транспортера, который в несколько раз больше. Очевидно, что точность взвешивания снижается, следовательно, чувствительность данной системы

невелика. Система чувствительна к весу материала, находящегося на ссыпавшем краю транспортера, но слабо реагирует на материал, поступающий на ленту. Наряду с динамическими воздействиями все это приводит к невысокой точности дозирования.

В устройстве, изображенном на рис. 2.8, в, загрузочный край транспортера установлен на весоизмерительную платформу. Система хорошо реагирует на вес материала, поступающего на ленту транспортера. В принципе, это позволяет быстро устранить погрешности в производительности, однако, как и в предыдущих случаях, методика обработки информации, поступающей с датчика, ошибочна [13].

В настоящее время все более широкое распространение получает способ "Loss-in-Weight", так из 40 ведущих фирм США этот способ используют 25 фирм. Типовая принципиальная схема для реализации способа "Loss-in-Weight" показана на рис. 2.9. Аналогичная схема используется в дозаторах типа ВД, выпускаемых отечественной промышленностью [14]. Устройство состоит из малого бункера 1, в нижней части которого установлен шнек 2 с приводом вращения 3. Бункер установлен на весоизмерительный датчик 4. Сигнал с весоизмерительного датчика подается на контроллер 5. Этот сигнал усиливается, масштабируется и сравнивается с заданным значением, которое зависит от требуемой производительности дозатора. Над малым бункером 1 установлен большой бункер 6 с шибером 7. Большой бункер соединен с малым бункером 1 эластичным патрубком 8, чтобы избежать дополнительных воздействий на весоизмерительный датчик 4. Система работает следующим образом. Из большого бункера 6 в малый бункер 1 подается порция сыпучего материала, после чего шибер 7 закрывается.

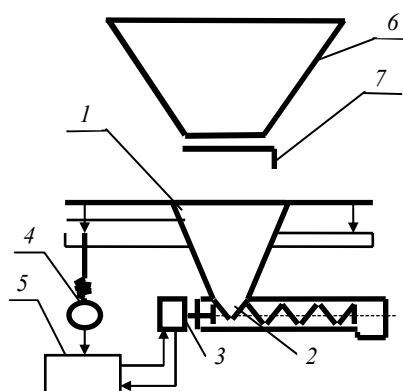


Рис. 2.9. Схема дозирующей системы "Loss-In-Weigh"

С весоизмерительного датчика 4 подается сигнал на контроллер 5, где фиксируется начальный вес материала в бункере 1. Включается привод 3, и шнеком 2 материал непрерывно выгружается из бункера 1. Через определенное время Δt с весоизмерительного датчика 4 подается сигнал на контроллер 5. Контроллер рассчитывает вес материала в бункере 1, который должен быть через отрезок времени Δt при заданной производительности и сравнивает это значение с показаниями датчика 4. Если вес материала в бункере 1 больше, чем расчетное значение, то контроллер 5 подает управляющий сигнал на привод 3 и увеличивает скорость вращения шнека, если вес материала в бункере 1 меньше расчетного значения, то скорость вращения шнека уменьшается. Когда вес материала в бункере 1 достигает минимального значения (примерно 0,1 от первоначального веса), контроллер 5 подает управляющий сигнал на шибер 7 и осуществляется загрузка очередной порции материала из бункера 6 в бункер 1. После этой операции цикл дозирования повторяется. В период загрузки очередной порции шнек 2 вращается с постоянной угловой скоростью.

Основные недостатки данного способа непрерывного весового дозирования заключаются в том, что на весовую платформу воздействует не только вес материала, находящегося в бункере, но вес самого бункера с питателем. Кроме этого, на датчик веса передаются динамические нагрузки от питателя, что существенно снижает точность дозирования.

Измерение производительности на выходе из дозатора осуществляется как контактными [15], так и бесконтактными [16] методами. В частности компания Brabender Technologie [15] использует устройство, схема которого показана на рис. 2.10.

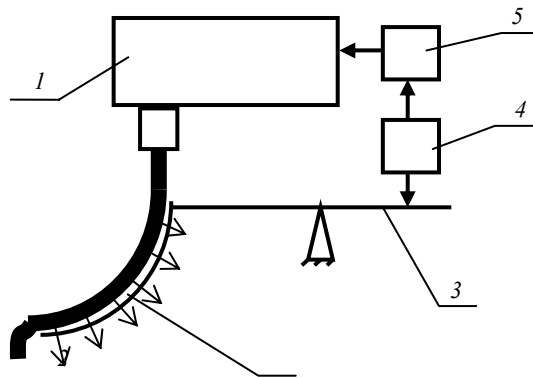


Рис. 2.10. Схема контактного метода измерения производительности

Материал с объемного питателя 1 поступает в желоб 2, который выполнен в виде четвертой части окружности. Желоб 2 жестко соединен с одним концом рычага 3, второй конец которого контактирует с весоизмерительным датчиком 4. Информация с весоизмерительного датчика 4 подается на контроллер 5, который управляет приводом объемного питателя 1. Поскольку материал движется по дуге окружности желоба 2 с некоторым ускорением, он воздействует на этот желоб не только силой веса, но и центробежной силой, а также силой Кориолиса. Таким образом, даже при малых массовых расходах силовое воздействие на желоб 2 достаточно для того, чтобы весовой датчик 4 фиксировал отклонения в массовом расходе порядка 1 %. При известных параметрах желоба и скорости движения материала усилия воздействия на датчик легко пересчитать в массовую производительность.

Как недостаток следует отметить, что при расчете производительности считаются постоянными физико-механические свойства дозируемого материала. В действительности же эти свойства могут существенно изменяться, что отрицательно влияет на достоверность получаемой информации, а следовательно, на точность дозирования. Так например, при изменении влажности дозируемого материала существенно (до 10 % и более) изменяется коэффициент его трения по поверхности желоба, а следовательно, и силовое воздействие на весоизмерительный датчик.

В бесконтактных датчиках используются различные электромагнитные и оптические эффекты. В частности, компанией Ramsey выпускается микроволновый датчик Granuflow DTR 131Z. В данном датчике используется эффект Доплера, и массовую производительность определяют в результате сравнения интенсивности излучаемой энергии и энергии, отраженной от движущегося потока сыпучего материала. Этот датчик может быть успешно использован в режиме пневмотранспорта или в ленточных конвейерах. По информации фирмы, чувствительность датчика порядка 2 г/с при скоростях от 1 см/с до 10 м/с. Совершенно очевидно, что датчик с такой чувствительностью может быть использован только при производительностях 100 кг/ч и более.

В результате анализа рассмотренных выше способов непрерывного дозирования сыпучих материалов было установлено, что одной из основных причин возникновения погрешностей при дозировании являются динамические воздействия на весоизмерительный датчик. Для устранения динамических воздействий используют многостадийное дозирование. Эволюция развития метода многостадийного дозирования показана на рис. 2.11 – 2.14.

Схема устройства для реализации порционного одностадийного весового дозирования показана на рис. 2.11. Устройство состоит из питателя 1 с приводом 2 и весовой платформы 3. При автоматическом режиме работы тара 4 подается на весовую платформу транспортером 5. После того, как тара установлена на весовую платформу, включается привод 2 питателя объемного принципа действия 1. При достижении требуемого веса материала с весовой платформы 3 подается управляющий сигнал на отключение привода 2. Для уменьшения динамических нагрузок на весовую платформу от падающего материала используют двухскоростной режим работы питателя. На первой стадии питатель работает с достаточно большой производительностью. После того, как вес материала достигает 90...95 % от заданного значения, существенно (примерно в 10 раз) уменьшают производительность питателя. Данный технологический прием позволяет повысить точность дозирования, но значительно уменьшает производительность дозатора.

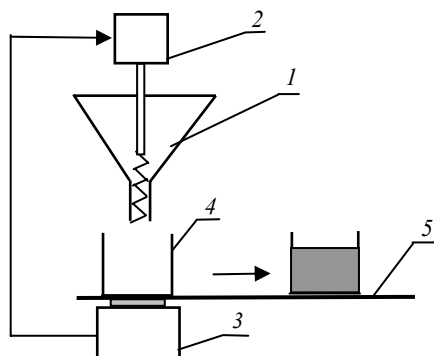


Рис. 2.11. Схема порционного дозирования

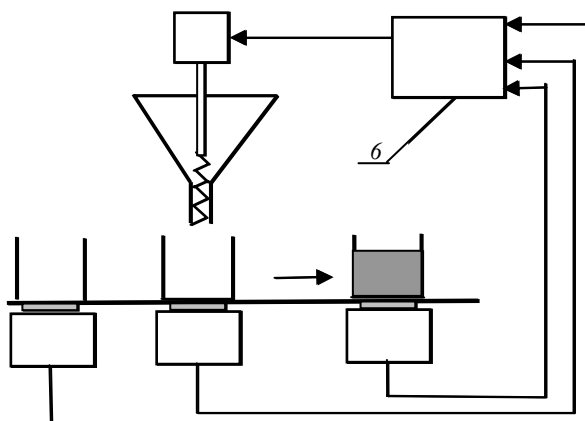


Рис. 2.12. Схема порционного дозирования с предварительным взвешиванием тары

Поскольку в процессе эксплуатации вес тары может изменяться за счет налипания продукта, организуют предварительное взвешивание тары (рис. 2.12). Кроме этого, осуществляется контрольное взвешивание порции в статическом состоянии. Результаты трех взвешиваний поступают в контроллер 6, который подает управляющие сигналы на привод шнекового питателя.

На рисунке 2.13 показана схема порционного дозирования зернистого материала в два этапа. На первом этапе в тару загружается объемным способом порядка 90 % от заданного количества материала. На втором этапе осуществляется контролируемая догрузка материала.

Еще быстрее и точнее реализуется порционное дозирование по схеме, представленной на рис. 2.14. После предварительного заполнения тары материал взвешивается и полученная информация подается на контроллер. Контроллер рассчитывает величину необходимой догрузки и подает соответствующий управляющий сигнал на привод второго питателя. В данной схеме легко можно организовать предварительное взвешивание тары и корректировку догрузки, поскольку осуществляется контрольное взвешивание материала.

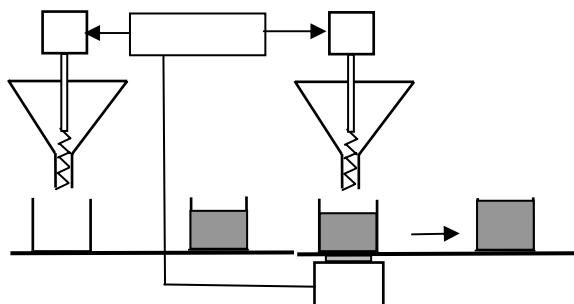


Рис. 2.13. Схема порционного дозирования в два этапа

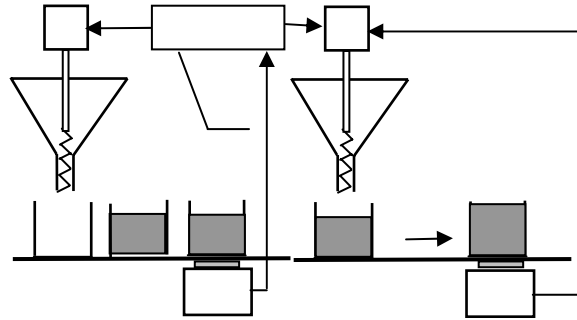


Рис. 2.14. Схема двухстадийного дозирования с корректировкой догрузки

На рисунке 2.15 показан весовой порционный дозатор роторного типа. Использование роторного принципа позволяет при минимальном количестве весовых платформ организовать многостадийное порционное дозирование с высокой производительностью. Еще большей производительностью и точностью дозирования обладает линия, показанная на рис. 2.16.



Рис. 2.15. Порционный дозатор роторного типа



Рис. 2.16. Линия для порционного дозирования

В технологических процессах приготовления многокомпонентных смесей часто используют автоматизированные дозировочные комплексы (см. рис. 2.17).

При микродозировании, как правило, используются автономные устройства, поскольку возникает необходимость неоднократных контрольных взвешиваний и догрузок (рис. 2.18).



Рис. 2.17. Автоматизированный дозировочный комплекс



Рис. 2.18. Устройство для весового микродозирования

2.4. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ДОЗИРОВАНИЯ

Под производительностью Q будем понимать вес материала P на выходе из дозатора за определенный промежуток времени Δt , т.е.

$$Q = P/\Delta t. \quad (2.6)$$

В силу многих причин, о которых будет сказано ниже, производительность постоянно изменяется. Если за бесконечно малый промежуток времени dt вес материала равен dp , то за промежуток времени Δt вес материала на выходе из дозатора будет равен:

$$P = \int_{t-\Delta t}^t p(t) dt. \quad (2.7)$$

Весовая производительность дозатора в единицу времени будет соответственно равна:

$$Q = \int_{t-\Delta t}^t p(t) dt / \Delta t. \quad (2.8)$$

Дозирование относится к механическим процессам и при его классификации выделяют равномерное и неравномерное дозирование [17]. На практике наиболее часто используют равномерное непрерывное дозирование, когда производительность равна заданному значению и не должна изменяться во времени. В действительности производительность постоянно изменяется, поскольку объемные питатели не могут

обеспечить абсолютно равномерную подачу дозируемого материала. Таким образом, непрерывное весовое дозирование следует рассматривать как случайный процесс. В этом случае реализация процесса за определенные интервалы времени является функцией этого случайного процесса [18]:

$$G_i(t) = \int_{t_H}^{t_K} Q(t) dt = \int_{t_i - \Delta t}^{t_i} \left[Q_{cp} + \sum_1^{i=n} \Delta Q_i(t) e^{-j\omega t} \right] dt, \quad (2.9)$$

где $\Delta t = t_K - t_H$.

В работе [18] влияние величины Δt на $\Delta G(\Delta t)$ рассмотрено на примере одной из неслучайных составляющих случайного процесса с частотой $\omega \Delta P \sin \omega t$. При этом

$$\Delta G(\Delta t) = \Delta Q \int_{t-\Delta t}^t \sin \omega t dt = -\frac{\Delta Q}{\omega} \cos \omega t \Big|_{t-\Delta t}^t = \frac{2\Delta Q}{\omega} \sin \frac{\omega \Delta t}{2} \sin \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right), \quad (2.10)$$

т.е. $\Delta Q(\Delta t)$ является синусоидой с амплитудой $(2\Delta P/\omega) \times \sin(\omega \Delta t/2)$, частотой ω и сдвигом по фазе $\Delta t/2$. В результате анализа полученной зависимости автор делает вывод о том, что при исследовании процесса дозирования выбор величины Δt оказывает решающее влияние на полноту получаемой информации. В основу выбора величины Δt должна быть положена длительность интервала, за который требуется обеспечить нормируемую величину точности дозирования для нормального ведения технологического процесса.

На практике точность непрерывного дозирования определяют следующим образом. На выходе из дозатора непрерывно отбирают пробы, причем каждая проба отбирается за интервал времени Δt . По результатам взвешивания проб рассчитывают средние квадратичные отклонения:

$$\sigma_G = \pm \sqrt{\frac{\sum_1^{i=n} (G_i - G_{cp})^2}{n-1}}, \quad (2.11)$$

где n – количество проб; G_i – текущая величина проб по параметру; G_{cp} – средняя величина пробы,

$$G_{cp} = \frac{\sum_1^n G_i}{n}.$$

Мы считаем, что принципиальной ошибкой в оценке точности дозирования является использование в формуле (2.11) среднего веса пробы $\langle \Delta G \rangle$. В математической статистике формула используется для расчета средних квадратичных отклонений случайных величин от их среднего значения. Таким образом, формула (2.11) позволяет оценить равномерность непрерывного потока, но не точность дозатора. При оценке точности дозирования необходимо оценить отклонения от заданного значения, следовательно, в формуле (2.11) вместо $\langle Q_{cp} \rangle$ следует использовать $\Delta Q_R = Q_R \Delta t$, где Q_R – заданная весовая производительность дозатора. Как показали результаты проведенных нами экспериментальных исследований, особенно существенные расхождения между расчетами по формуле (2.11) и реальными отклонениями от заданной производительности наблюдаются при определении точности питателей объемного принципа действия. Так, например, неравномерность непрерывного потока на выходе из шнекового питателя составляла 2 %, а точность дозирования – 7 % ($\Delta t = 60$ с). Разница между расчетными и действительными значениями весовой производительности увеличивается при уменьшении интервала времени, за который отбирается каждая проба. В том же эксперименте при $\Delta t = 10$ с точность дозирования была ниже 12 %, а неравномерность непрерывного потока снизилась всего до 4 %.

При создании систем непрерывного приготовления смесей сыпучих материалов для выбора дозаторов и разработки схемы автоматизации процесса необходимо знать требуемую точность дозирования. Она характеризуется отклонением массы образующейся в единицу времени смеси от номинальной и отклонением содержания отдельных компонентов в смеси от заданного.

На практике используются два способа обеспечения точности состава смеси [19].

1. Для каждого компонента смеси задают предельные отклонения от номинального количества данного компонента – в процентах или количественных единицах.

Так, при приготовлении протекторной резиновой смеси на 100 кг каучука требуется $1,8 \pm 0,01$ кг серы, $3,5 \pm 0,03$ кг цинковых белил, $65 \pm 0,5$ кг технического углерода и т.д. В этом случае точность дозатора для каждого компонента однозначно определяется требуемой точностью дозирования этого компонента.

2. Предельные отклонения от номинального содержания компонентов в смеси задают в процентах от общего количества смеси.

Например, требуемая точность дозатора в случае приготовления металлографитовых смесей электроугольных производств не определяется однозначно заданной точностью дозирования компонента, а зависит от абсолютного содержания этого компонента в смеси.

Введем следующие обозначения: A и B – доли компонентов в смеси; G – номинальное содержание смеси; ΔA и ΔB – предельные отклонения количества компонентов A и B (в долях) от их номинального содержания; ΔG – предельное отклонение количества смеси (в долях) от его номинального значения.

Тогда количество компонента A в смеси составит $GA(1 + \Delta A)$, а компонента B – $GB(1 + \Delta B)$.

Суммарное количество смеси

$$G(1 + \Delta G) = GA(1 + \Delta A) + GB(1 + \Delta B).$$

Откуда

$$\Delta G = A + A\Delta A + B + B\Delta B - 1$$

или, учитывая, что по условию $A + B = 1$,

$$\Delta G = A\Delta A + B\Delta B. \quad (2.12)$$

Рассчитанное по формуле (2.12) значение ΔG будет справедливо, если на отклонение суммарного количества смеси от номинального нет дополнительных ограничений, вызванных необходимостью обеспечения непрерывного технологического процесса производства.

При заданной точности дозирования смеси ΔG

$$\Delta A = \frac{\Delta G - B\Delta B}{A}, \quad (2.13)$$

$$\Delta B = \frac{\Delta G - A\Delta A}{B}. \quad (2.14)$$

Для смеси, содержащей N компонентов, уравнения (2.12) – (2.14) по аналогии будут иметь вид:

$$\Delta G = A\Delta A + B\Delta B + \dots + N\Delta N, \quad (2.15)$$

$$\Delta A = \frac{\Delta G - B\Delta B - \dots - N\Delta N}{A}, \quad (2.16)$$

...

$$\Delta N = \frac{\Delta G - A\Delta A - B\Delta B - \dots - (N-1)\Delta(N-1)}{N}. \quad (2.17)$$

Приведем пример практического использования предложенных уравнений.

Одна из смесей, применяемых для изготовления электроугольных изделий, имеет следующий состав: на 100 кг смеси – 90 ± 2 кг меди и 10 ± 2 кг графита.

Из уравнения (2.12) получим:

$$\Delta G = 0,9 \frac{2}{90} + 0,1 \frac{2}{10} = 0,04.$$

Предположим, что для меди выбран дозатор, обеспечивающий предельное отклонение $\Delta A = 0,02$.

Тогда из уравнения (2.14) следует, что для графита $\Delta B = 0,2$. В рассмотренном случае отклонение количества смеси от номинального определяется лишь предельными отклонениями для компонентов, а суммарное количество смеси не лимитируется. Если же принять, что такое ограничение существует и предельное значение ΔG не должно превышать, например, 0,02, то при том же $\Delta A = 0,02$ получим $\Delta B = 0,02$.

Медь – хорошо сыпучий материал, поддающийся дозированию серийными весовыми дозаторами, обеспечивающими отклонение 1...1,5 %. Графит является плохо сыпучим материалом, для которого трудно добиться такой точности дозирования.

Поскольку для меди возможна точность дозирования $\Delta A = 0,01$, рассчитаем значение ΔB для этого случая и получим $\Delta B = 0,11$.

Эту точность дозирования даже для графита может обеспечить объемный дозатор со шнековым ворошителем.

Таким образом, расчет требуемой точности дозирования с помощью уравнений (2.15) – (2.17) позволяет оптимизировать подбор дозаторов в случае приготовления многокомпонентной смеси.

2.5. КОРРЕКТИРОВКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

В настоящее время корректировка производительности осуществляется только после того, как обнаружены отклонения реальной весовой производительности от заданного значения. Вероятность обнаружения отклонения и правильность определения численной величины этого отклонения зависят от многих факторов, а именно: точности чувствительного элемента (первичного преобразователя); точности весового датчика в целом (включая передаточные звенья); методики преобразования сигнала от датчика в весовую производительность и т.д. Особое внимание следует обратить на методику преобразования информации, которая поступает с датчика веса, в весовую производительность. Погрешности при дозировании классифицируют на систематические, случайные и грубые [18]. К систематическим относят погрешности, вызванные неточностями самого дозатора, которые возникают в процессе проектирования, изготовления и эксплуатации. В частности, к ним относят ошибки, вызванные отклонениями скорости ленты от заданного значения, износ рабочих кромок выпускного отверстия и т.д. Отмечается, что систематические ошибки могут быть устранены в результате тарирования дозатора.

Несовершенство методик преобразования показаний датчика в весовую производительность не могут быть исключены путем тарирования дозатора. Так, например, предположение о равномерном распределении материала на ленте транспортера при расчете весовой производительности ленточных дозаторов, в принципе, не позволяет определить истинное распределение дозируемого материала по длине транспортерной ленты. Это приводит к ошибкам в расчете производительности, следовательно, к ошибкам при корректировке.

Рассмотрим традиционную методику определения производительности и ее корректировку на примере ленточного весового дозатора, схема которого показана на рис. 2.8, в. Разделим ленту транспортера по длине L на 5 равных участков и предположим, что на этой ленте равномерно распределен зернистый материал с массой 15 единиц (рис. 2.19, а).

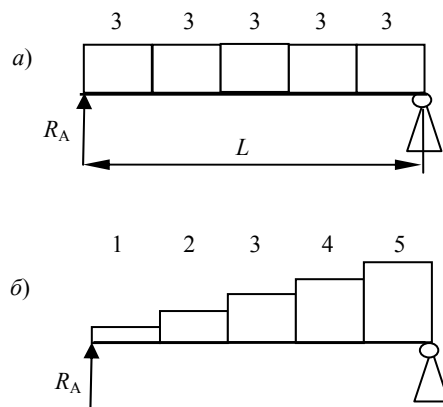


Рис. 2.19. Распределение зернистого материала на ленте дозатора

В этом случае показания датчика веса (без учета веса конвейера) будут равны 7,5 (реакция R_A). Допустим, что это соответствует заданной производительности дозатора $q = mv/L$, где m – масса материала на ленте, а v – скорость движения ленты. Предположим, что зернистый материал распределен по длине ленты не равномерно, но его масса по-прежнему равна 15 единиц (рис. 2.19, б). В этом случае датчик будет показывать 5,5. В предположении равномерного распределения материала на ленте контроллер рассчитает массу материала следующим образом $m = 5,5 \times 2 = 11$. Сравнивая полученное значение производительности $q = mv/L = 11v/L$ с требуемой производительностью $15v/L$, контроллер примет решение о необходимости увеличения производительности на 26,6%. В действительности за промежуток времени $\Delta t = L/v$ производительность дозатора равна заданной производительности. Еще большие ошибки возникают, если производительность корректируется за интервалы времени меньше чем Δt .

Таким образом, проблема заключается в том, что при одном и том же суммарном весе материала на ленте весовой датчик может регистрировать разные значения усилий и, как следствие, контроллер дает неправильный сигнал корректировки.

Для количественной оценки погрешностей дозирования, которые возникают при использовании технологии "Loss-in-Weigh", рассмотрим процесс более детально. Можно выделить следующие операции, реализуемые в течение одного цикла процесса: взвешивание дозатора с материалом; расчет веса материала в бункере; определение веса материала, который был выгружен из бункера за промежуток времени Δt ; принятие решения о

необходимости корректировки производительности питателя; корректировка производительности. Рассмотрим каждую из операций.

1. Определение общего веса на платформе.

По информационным материалам фирм, выпускающих дозаторы данного типа, производительность может изменяться (в зависимости от размеров дозатора) от 0,1 до 4500 кг/ч. Поскольку максимальные погрешности возникают при малых производительностях, будем считать, что производительность дозатора равна 2гс^{-1} (7,2 кг/ч). Загрузка малого бункера осуществляется каждые 10...15 мин, следовательно, максимальный вес материала в бункере – 1200 г, а минимальный 120 г. Вес оборудования, установленного на весовой платформе, при указанной производительности дозатора не менее 15 кг. Таким образом, максимальный вес на платформе $P_0 = 16\ 200$ г. По информации компании "SARTORIUS AG" [20], являющейся мировым лидером по производству весовых платформ повышенной точности, при указанном максимальном весе дискретность измерений ζ равна 1 г. Учитывая это, можно утверждать, что результаты определения общего веса могут быть: $P_0(i) = 16\ 200; 16\ 201; 16\ 199$ г. Производители утверждают, что контроль веса и корректировка производительности объемного питателя осуществляется десятки раз в минуту. Будем считать, что $\Delta\tau = 10$ с, тогда при следующем измерении, даже при абсолютно точном дозировании с производительностью 2гс^{-1} , возможны следующие значения общего веса: $P_0(i+1) = 16\ 180; 16\ 181; 16\ 179$ г.

2. Определение веса материала.

Сделаем допущение о том, что вес оборудования определен абсолютно точно, т.е. равен 15 000 г. В результате определения веса материала в бункере (P_m) возможны следующие варианты: $P_m(i) = 1200; 1201; 1199$ г; $P_m(i+1) = 1180; 1181; 1179$ г.

3. Определение веса материала (ΔP_m), который был выгружен из бункера за промежуток времени $\Delta\tau$.

$$\Delta P_m = P_m(i) - P_m(i+1).$$

Очевидно, что возможны следующие варианты:

$$\Delta P_m = 20\text{ г}; \Delta P_m = 21\text{ г}; \Delta P_m = 22\text{ г}; \Delta P_m = 19\text{ г}; \Delta P_m = 18\text{ г}.$$

4. Принятие решения о необходимости корректировки производительности питателя.

При производительности 2гс^{-1} вес материала в бункере должен был уменьшиться на величину $[\Delta P_m] = 20$ г. Решение о необходимости корректировки принимается с учетом разницы (Δ) значений ΔP_m и $[\Delta P_m]$. При этом учитывается как величина, так и знак полученной разности. В рассматриваемом примере значения указанной разности могут быть равны: $\Delta = 0; 1; 2; -1; -2$. Совершенно очевидно, что в сложившейся ситуации велика вероятность принятия неправильного решения. Более того, погрешность измерения, следовательно, и точность дозирования $\pm 2\%$.

5. Корректировка производительности.

Даже если предположить, что решение о целесообразности корректировки принято верно и точно определено, на какую величину необходимо изменить производительность весового питателя, положительный результат, т.е. повышение точности дозирования после проведения корректировки, далеко не очевиден.

Следует обратить внимание на разницу между равномерностью непрерывного потока на выходе из питателя и точностью дозирования. Равномерность определяется отклонениями мгновенной производительности от среднего значения этой производительности за период проведения оценки равномерности потока. Точность дозирования определяется отклонениями мгновенной производительности от заданных значений. Результаты экспериментальных исследований, о которых подробно сказано в главе 3, показали, что равномерность непрерывного потока на выходе из шнекового питателя, в отдельных случаях, действительно может быть $\pm 1...2\%$. В то же время точность дозирования порядка $\pm 5\%$. Таким образом при попытке улучшить точность дозирования при отклонениях в 2% в результате корректировки погрешность может увеличиться до 5% и более.

Приведенный выше пример показывает только последовательность и принцип определения погрешностей дозирования. В действительности погрешности в определении веса материала, находящегося в бункере, носят случайный характер. При математическом анализе и составлении имитационных моделей следует использовать функцию распределения нормального закона со средним значением измеряемого веса и дисперсией, которая зависит от класса точности весовой платформы и условий ее эксплуатации (динамические воздействия от объемного питателя, возможная вибрация основания и т.д.).

В соответствии с рассмотренной последовательностью проведения процесса непрерывного весового дозирования была составлена имитационная модель и разработана программа расчета на ПК. При определении функций распределения отклонений весовых платформ использовали информационные материалы компании "SARTORIUS AG". При моделировании работы шнекового питателя использовали результаты лабораторных и промышленных экспериментов ряда зарубежных исследователей [21 – 23], а также результаты собственных экспериментов [24, 25].

Анализ результатов численных экспериментов показал, что обеспечение точности дозирования порядка $0,5...1\%$ при использовании принципа "Loss-in-Weight" реально при производительности $25...30\text{гс}^{-1}$ (100 кг/ч) и более. При меньших производительностях нельзя гарантировать столь высокую точность дозирования. Так, например, при производительности 1гс^{-1} точность выше 1% практически не достижима.

Поскольку данная технология широко используется как отечественными, так и зарубежными производителями весовых дозаторов непрерывного действия, определим минимальный промежуток времени между замерах веса материала в бункере. Если время между замерах веса $\Delta\tau$, заданная производительность Q гс⁻¹ с предельно допускаемыми отклонениями $\pm\varepsilon\%$, дискретность весовой платформы ζ г, а производительность питателя $q(\tau)$, то необходимо выполнение следующего неравенства:

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} q(\tau) d\tau - Q > \zeta. \quad (2.18)$$

Другими словами, измерение веса следует производить только тогда, когда возможная погрешность в весе превысит дискретность весовой платформы. Особое внимание следует обратить на то, что выбор весовой платформы и определение дискретности измерения необходимо проводить по максимальному суммарному весу оборудования, установленного на эту платформу, и материала в бункере.

Учитывая вышесказанное, при выборе весового дозатора непрерывного принципа действия наилучшим вариантом следует считать тестирование дозатора на конкретном материале при минимальной производительности, необходимой потребителю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. Т. 1. Основы теории процессов химической технологии / Д.А. Баранов [и др.] ; под ред. А.М. Кутепова. – М. : Логос, 2000. – 500 с.
2. Катамыов, А.В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А.В. Катамыов, В.А. Любартович. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.
3. Рогинский, Г.А. Дозирование сыпучих материалов / Г.А. Рогинский. – М. : Химия. – 1978. – 176 с.
4. Hoppe, H. Equipment for feeding material into pneumatic conveying systems / H. Hoppe // International symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III). – Porsgrunn, Norway, August 1999. – P. 687 – 700.
5. Wypych, P.W. The problem with dilute-phase pneumatic conveying / P.W. Wypych // The 3-rd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids. Joined with 10-th International Freight Pipeline Society Symposium. – Dead Sea, Israel, May 2000. – P. 10.45 – 10.58.
6. Пат. 2103205 РФ, МКИ⁶ В 65 В 1/36, 1/20. Дозатор-уплотнитель сыпучих материалов / А.И. Зайцев, А.В. Оборин, А.Б. Капранова, Д.О. Быгев ; заявитель и патентообладатель: Ярославский гос. техн. ун-т. – № 96117229/13 ; заявл. 27.08.96 ; опубл. 27.01.98, Бюл. № 3.
7. Мурашов, А.А. Математическая модель движения и уплотнения порошков в шнековом уплотнителе / А.А. Мурашов, А.Б. Капранова, А.И. Зайцев // Техника и технология сыпучих материалов : межвузовский сб. науч. трудов / Иван. хим.-технол. ин-т. – Иваново, 1991. – С. 32 – 37.
8. Капранова, А.Б. Математическая модель механического уплотнения порошка в вертикальном цилиндре / А.Б. Капранова, А.А. Мурашов, А.И. Зайцев // Процессы в дисперсных средах : межвузовский сб. науч. трудов / Иван. гос. хим.-технол. академия. – Иваново, 1997. – С. 131 – 144.
9. К вопросу промышленного использования углеродных наноматериалов / С.В. Першина, В.Ф. Першин, А.Г. Ткачев, А.И. Шершукова // Приборы. – 2007. – № 10. – С. 57 – 60.
10. ДВЛ-Н. Дозатор весовой ленточный непрерывного действия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenzo-pribor.ru/cft574.html>, свободный.
11. Преобразователь частоты Siemens [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.privod.su/Siemens>, свободный.
12. Лабораторное оборудование и приборы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.linolab.ru/katalog_tovarov/, свободный.
13. Использование имитационного моделирования при расчетах ленточных весовых дозаторов / А.И. Инякин, А.Ю. Давидчук, Д.В. Филимонов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов, 2004. – Вып. 15. – С. 27 – 30.
14. Весовой дозатор ВД-100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.3f-eng.ru/equipment_batching_detail.php?id=104, свободный.
15. Flow meters [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brabenderti.com>, свободный.
16. Ramsey Granuflow DTR 131 Z [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.thermoramsey.de/html/body_dtr131z_231z.html, свободный.
17. Баранов, Д.А. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобие, моделирование, проектирование. Т. 2. Механические и гидромеханические процессы / Д.А. Баранов [и др.] ; под ред. А.М. Кутепова. – М. : Логос, 2001. – 600 с.
18. Видинеев, Ю.Д. Автоматическое непрерывное дозирование сыпучих материалов / Ю.Д. Видинеев. – М. : Энергия, 1074. – 120 с.
19. Першин, В.Ф. К расчету точности дозирования / В.Ф. Першин, Е.Н. Капитонов, Н.А. Деревякин // Каучук и резина. – 1983. – № 10. – С. 44–45.
20. Платформенные весы – серия IS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sartogsm.ru/production/9213>, свободный.

21. Roberts, A.W. Mechanical transport in bulk solids processing and handling / A.W. Roberts // International symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III). – Porsgrunn, Norway, August 1999. – P. 567 – 616.
22. Rivkin, M. The simplifying theory of screw conveyors (horizontal and inclined) / M. Rivkin // The 2-nd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids / The International Convention Center. – Jerusalem, Israel, May, 1997. – P. 6.15 – 6.19.
23. Schelsinger, D. Screw conveyors and feeders – principals of engineering calculation – review / D. Schelsinger, A. Papkov // The 2-nd Israeli Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids / The International Convention Center. – Jerusalem, Israel, May, 1997. – P. 6.20 – 6.24.
24. Барышникова, С.В. Модернизация шнекового питателя для непрерывного дозирования сыпучих материалов / С.В. Барышникова, Д.В. Филимонов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 17 – 20.
25. Филимонов, Д.В. Расчет производительности шнековых и спиральных питателей / Д.В. Филимонов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 64 – 68.
26. Моделирование процесса непрерывного двухстадийного дозирования порошкообразных материалов / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, А.А. Осипов, Д.В. Филимонов // Математические методы в технике и технологиях : сб. трудов XV Междунар. науч. конф. в 10 т. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. – Т. 3. – С. 12 – 14.

Для формирования непрерывного потока зернистого материала в весовых дозаторах непрерывного действия наиболее часто применяются следующие типы питателей: ленточный; шнековый; спиральный; секторный; вибрационный. На наш взгляд, хорошие перспективы промышленного использования имеют трубчатые питатели. Рассмотрим более подробно указанные типы питателей объемного принципа действия.

3.1. ЛЕНТОЧНЫЕ ПИТАТЕЛИ

Ленточные питатели чаще всего используются в ленточных весовых дозаторах. На рисунке 3.1 дана типовая схема ленточного питателя объемного принципа действия.

Питатель состоит из бункера 1 с задвижкой 2 и ленточного транспортера 3 с приводом 4. Объемная производительность может регулироваться, как положением задвижки 2, так и скоростью движения ленты 3. Точность подачи зависит от характера истечения зернистого материала из бункера 1 на ленту транспортера 3. В свою очередь, характер истечения или высыпания зернистого материала из бункера зависит от формы и размеров бункера 1 и выпускного отверстия в задвижке 2, скорости движения ленты транспортера 3, вибрации этой ленты и т.д.

Одна из проблем ленточного питателя заключается в том, что наблюдается неравномерное истечение зернистого материала из бункера. В частности, в зоне А, которая прилегает к передней стенке бункера, материал практически не движется. Для устранения этого нежелательного эффекта применяют различные конструктивные приемы. На рисунке 3.2 показана схема истечения зернистого материала из бункера.

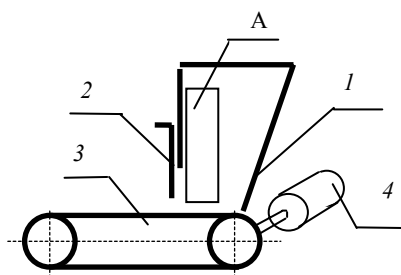


Рис. 3.1. Схема ленточного питателя

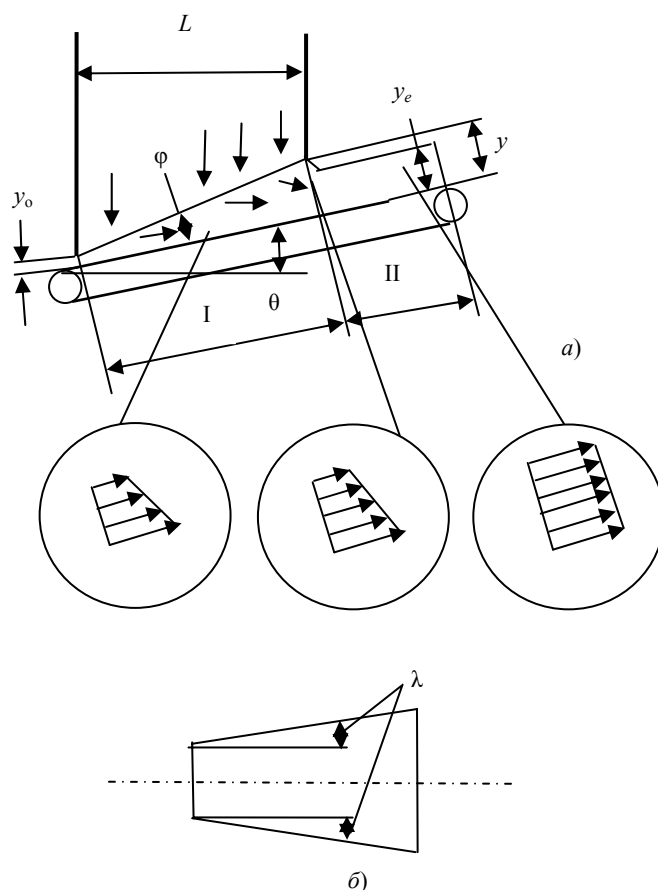


Рис. 3.2. Схема истечения материала из бункера и профили скоростей

Прежде всего, предложено устанавливать ленточный транспортер под некоторым углом θ к горизонтали. Нижний край бункера наклонен относительно ленты транспортера на угол φ . Боковые стенки бункера наклонены к оси под углами λ таким образом, что бункер расширяется по направлению к разгрузочному отверстию (рис. 3.2, б).

В зоне сдвига (зона I) материал из бункера попадает на ленту. Поскольку лента постоянно движется, в этой зоне происходит сдвиг одних слоев материала относительно других слоев. Такая ситуация наблюдается вплоть до разгрузочного отверстия. В зоне II материал свободно движется вместе с лентой. Массовую производительность питателя можно рассчитать следующим образом:

$$Q = \rho_n B y_e v, \tag{3.1}$$

где ρ_n – насыпная плотность зернистого материала в зоне II; B – ширина разгрузочного отверстия; v – скорость движения ленты.

Следует отметить, что ρ_n меньше, чем насыпная плотность материала в зоне I, поскольку отсутствует давление материала, находящегося в бункере. В работе [1] высоту слоя на ленте предлагают рассчитывать по следующей формуле:

$$y_e = y((1 + C_e)/2) (\rho/\rho_n), \tag{3.2}$$

где C_e – параметр, характеризующий распределение скорости зернистого материала на выходе из бункера.

Оптимальное значение угла λ рассчитывается по формуле:

$$\operatorname{tg} \lambda = (B/2L) / \{ [2/(1 - y_e/y)] [1/(1 - C_e) - y_e/H] - 0,5 \}. \tag{3.3}$$

Зависимость оптимального значения угла λ от соотношения L/B показана на рис. 3.3.

Следует отметить, что приведенная зависимость для расчета массовой производительности ленточного питателя может быть использована только для предварительных расчетов. Окончательно вопрос о зависимости производительности от скорости движения ленты и размеров разгрузочного отверстия решается при тарировке ленточного питателя.

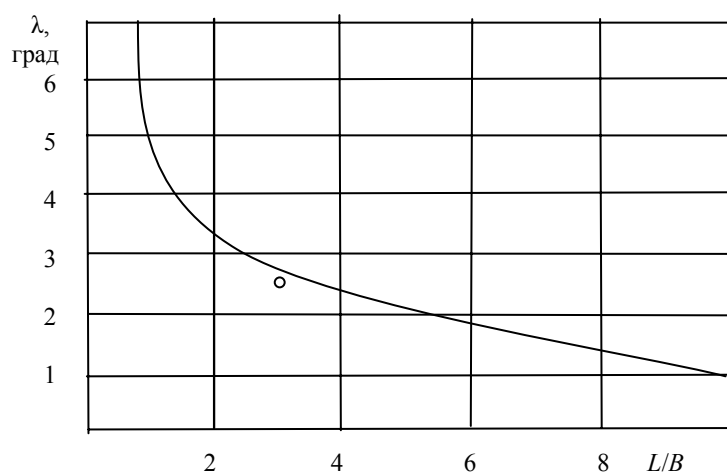


Рис. 3.3. Зависимость оптимального значения угла λ от L/B



Рис. 3.4. Ленточный питатель типа HD

Компания Vibra Screw Inc [2] выпускает ленточные питатели двух типов: LBB Belt Feeder; HD Volumetric Belt Feeder. Питатель LBB представляет собой бункер с нижней разгрузкой, снабженный вибрирующей насадкой и установленный над ленточным транспортом. Прецизионный шибер, снабженный микрометрическим винтом, позволяет изменять производительность в 20 раз при постоянной скорости ленты и постоянных параметрах вибратора. За счет шибера и изменений параметров вибрации насадки производительность питателя может изменяться в 100 раз. Предусмотрен также вариант изменения скорости движения ленты. Питатель HD (Heavy Duty belt feeders) предназначен для работы в тяжелых условиях. Он может работать с различными типами бункеров. Выпускаются пять моделей с производительностью 70, 400, 1200, 1400 и 4800 футов кубических в час. На рисунке 3.4. представлен один из ленточных питателей.

3.2. ШНЕКОВЫЕ И СПИРАЛЬНЫЕ ПИТАТЕЛИ

При дозировании плохо сыпучих материалов наиболее часто используются шнековые и спиральные питатели. На рисунке 3.5 показана базовая конструкция шнекового питателя.

Питатель состоит из бункера 1, шнека 2 и привода 3. Равномерность непрерывной подачи зернистых материалов зависит от многих факторов: форма и размеры бункера; размеры отдельных частей шнека и их соотношения; скорость и равномерность вращения шнека; физико-механические характеристики дозируемого материала.

Объемную производительность шнекового или спирального питателя можно рассчитать по следующей формуле [3]:

$$V = \eta_V \pi P (R_{out}^2 - R_{in}^2). \quad (3.4)$$

Таким образом, объемную эффективность шнековых питателей можно оценить коэффициентом η_V :

$$\eta_V = V / \pi P (R_{out}^2 - R_{in}^2), \quad (3.5)$$

где V – реальный объем материала, высыпавшийся из дозатора за один оборот шнека; R_{out} , R_{in} – соответственно наружный и внутренний радиусы шнека; P – шаг витка.

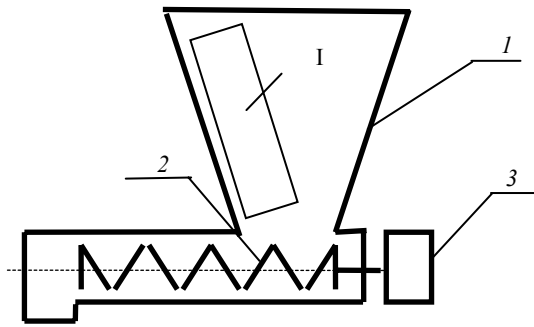


Рис. 3.5. Схема шнекового питателя

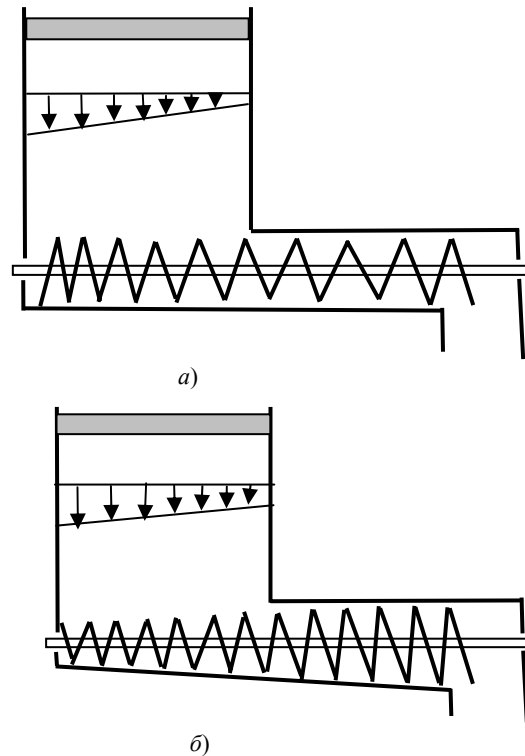
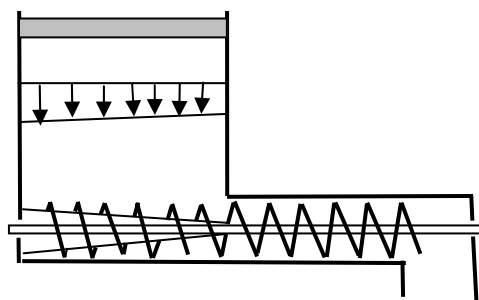


Рис. 3.6. Шнеки с увеличивающимся шагом или диаметром

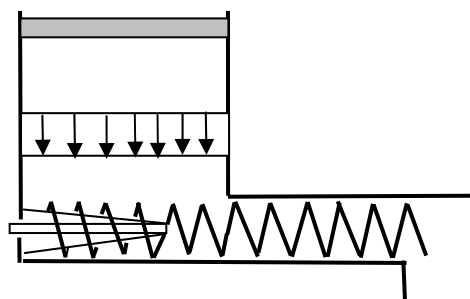
При работе шнековых и спиральных питателей наблюдается неравномерное движение зернистого материала в бункере, что отрицательно сказывается на постоянстве производительности. В частности, при использовании шнека с постоянным диаметром и постоянным шагом витков (рис. 3.5) в зоне А материал практически неподвижен, т.е. образуется застойная зона. Застойную зону можно уменьшить или совсем устранить за счет изменения конструкции шнека [4]. Некоторые конструкции шнеков представлены на рис. 3.6, 3.7.

В частности, на рис. 3.6, а показан шнек с увеличивающимся шагом витков. Данное решение позволяет исключить застойную зону, но скорость движения материала в бункере не одинаковая. Такая же ситуация наблюдается при использовании шнека с увеличивающимся диаметром (рис. 3.6, б).

Более эффективное решение заключается в сочетании двух предыдущих решений (рис. 3.7, а) или в комбинации шнека и спирали (рис. 3.7, б). В этих случаях удастся организовать равномерное движение зернистого материала по всей ширине бункера. Следует особо отметить, что при изменении размеров или геометрии шнека изменяется коэффициент объемной эффективности, и это необходимо учитывать при расчетах.



a)



б)

Рис. 3.7. Шнеки с изменяющейся формой

Одной из ведущих компаний по производству шнековых питателей является K-TRON SODER [5]. В таблице 3.1 представлена информация о производительности некоторых моделей одно- и двухшнековых питателей, выпускаемых данной компанией.

Таблица 3.1

Модель	Минимальная производительность		Максимальная производительность	
	dm ³ /hr	ft ³ /hr	dm ³ /hr	ft ³ /hr
KQx4	0,12	0,002	313	6,49
S60	0,12	0,004	15 800	580
S100	10	0,4	900	318
S500	45	1,6	45 300	1585
T60	13	0,45	7200	250
KT20	0,03	0,001	200	7,1
T35	1,2	0,04	2041	72,1
MT12	0,04	0,0014	4,0	0,14
BSP-100	2	0,07	400	14
BSP-135	22	0,8	4400	155
BSP-150-S	34	1,2	6700	237
BSP-150-P	46	1,6	9000	318



a)



б)

Рис. 3.8. Шнековые питатели:

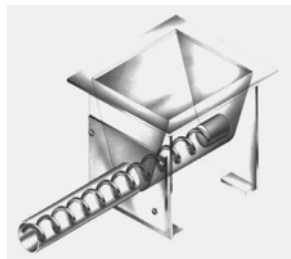
a – стандартный вариант; *б* – вариант с повышенной точностью

На рисунке 3.8 представлены два шнековых питателя, которые выпускает компания Vibra Screw Inc [6].

Максимальная производительность в разных моделях зависит от диаметра шнека. В таблице 3.2 представлена информация о производительности (Q , м³/ч) питателей компании Vibra Screw Inc в зависимости от диаметра шнека (D , мм).

Таблица 3.2

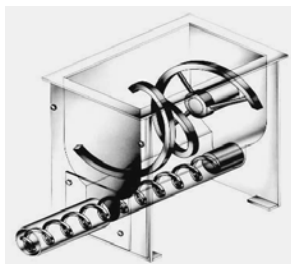
D	6	10	13	16	19	25	38	51	76	102
Q	0,001	0,003	0,007	0,01	0,03	0,1	0,2	0,6	2,0	6,0



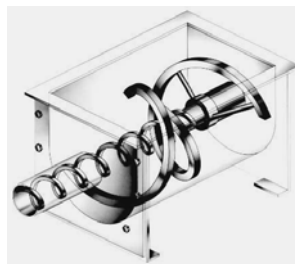
a)



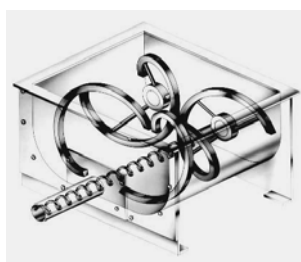
б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 3.9. Спиральные питатели компании Vibra Screw Inc.

Данная компания выпускает также спиральные питатели, представленные на рис. 3.9.

В таблице 3.3 представлена информация о максимальной производительности (футы кубические в час) в зависимости от угловой скорости вращения спирали (c^{-1}).

В группе винтовых питателей следует отметить питатель винтовой ПВ-200 [7], отличающийся применением трехскоростного двигателя, позволяющего использовать данный питатель в качестве "грубого" дозатора. При подаче постоянного материала подбирается опытным путем время работы питателя на разных режимах, т.е. дозирование происходит по времени. Кроме того, для облегчения движения материала шнек выполнен двухзаходным.

Производительность – 4,2,1 л/с, длина транспортирования – 860 мм, диаметр шнека – 200 мм.

Применяется в установках по производству сухих строительных смесей.

Реверсивный шнековый питатель ПРШ-0,25 [8] предназначен для реверсивного транспортирования сыпучих материалов крупностью не более 2 мм. Состоит из корпуса с патрубком загрузки и двумя патрубками разгрузки, внутри которого расположен шнек, приводимый во вращение двигателем. Материал, поступающий в патрубок загрузки, в зависимости от направления вращения шнека, подается в тот или иной патрубок разгрузки.

Основные характеристики питателя представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.3

МОДЕЛЬ BDFM				
Производительность, футы кубические в час				
Размер	Минимальная производительность			Максимальная производительность
	Диапазон изменения скорости			
	10:1	30:1	50:1	
BDFM-A/2	0,003	0,001	0,0006	0,03
BDFM-B/2	0,0075	0,0025	0,0015	0,075
BDFM-C/2	0,045	0,015	0,009	0,45
BDFM-D/2	0,12	0,04	0,024	1,2
BDFM-E/2	0,30	0,10	0,06	3,0

3.4. Техническая характеристика питателя ПРШ-0,25

Наименование	Значение
Производительность, м ³ /ч	25
Длина транспортирования, мм	0,97/1,47
Диаметр шнека, м	0,25
Шаг шнека, м	0,2
Частота вращения шнека, об/мин	60
Редуктор	24-80-25-56-1-2-У2 ТУ2-056-218-83
Мощность двигателя, кВт	2,2
Габаритные размеры (L × B × H), мм	3083 × 732 × 437
Масса, кг	205

3.3. СЕКТОРНЫЕ ПИТАТЕЛИ

В технической литературе можно встретить разные названия данного типа питателей: питатели с валом; секторные питатели; барабанные питатели; вращающийся клапан (rotary valve) и другие. Схемы некоторых конструкций представлены на рис. 3.10.

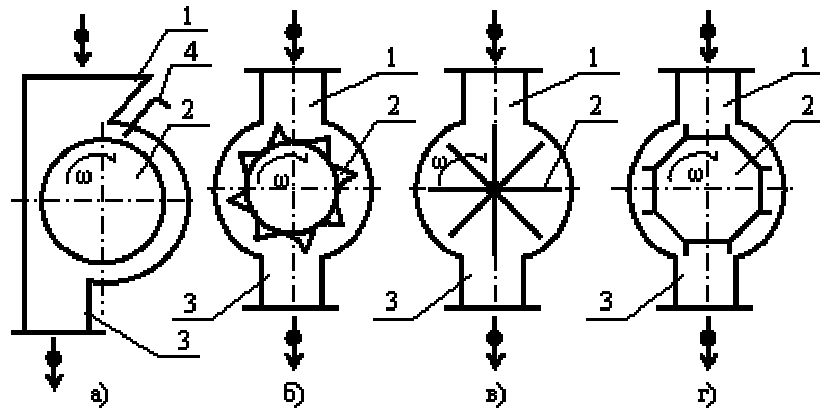


Рис. 3.10. Схемы секторных питателей:

а – цилиндрический; *б* – ячеистый; *в* – лопастной; *г* – с граненым барабаном;
 1 – приемно-питающее устройство; 2 – барабан;
 3 – выпускное устройство; 4 – задвижка

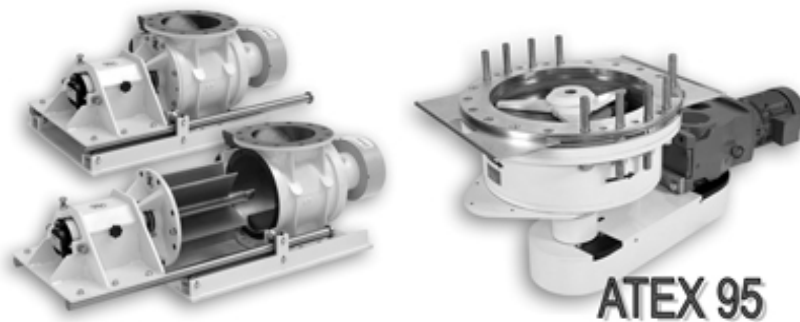


Рис. 3.11. Секторные питатели

При расчете объемной производительности секторных питателей, как и шнековых, необходимо знать коэффициент объемной эффективности η_v . Значение данного коэффициента зависит от геометрических и режимных параметров питателя, а также от физико-механических свойств дозируемого материала. При расчетах необходимо учитывать, что время пребывания каждой ячейки в загрузочной зоне должно быть больше чем время, которое необходимо частице для падения на дно ячейки. Таким образом, существует достаточно жесткая зависимость между скоростью вращения ротора, шириной зоны загрузки и глубиной ячейки. Иногда для достижения равномерного и полного заполнения ячеек уменьшают их глубину (рис. 3.10).

На рисунке 3.11 представлены некоторые промышленные секторные питатели [9].

3.4. ВИБРАЦИОННЫЕ ПИТАТЕЛИ

Вибрационные питатели имеют меньшую металлоемкость, а их удельные энергозатраты практически не зависят от производительности.

Конструкция вибрационных питателей проста и надежна, отличается небольшими габаритами и отсутствием вращающихся частей. Базовая схема вибрационного питателя показана на рис. 3.12. Питатель состоит из бункера 1, лотка 2, вибратора 3, задвижки 4 и основания 5. При вибрации лоток 2 сыпучий материал из бункера 1 вытекает на этот лоток и выгружается из питателя в виде непрерывного потока. Производительность регулируется частотой, амплитудой и направлением вибрации, а также геометрическими размерами лотка 2 и положением задвижки 4. Существуют различные модификации вибрационных питателей, которые позволяют повысить точность дозирования и учесть специфические особенности сыпучего материала.

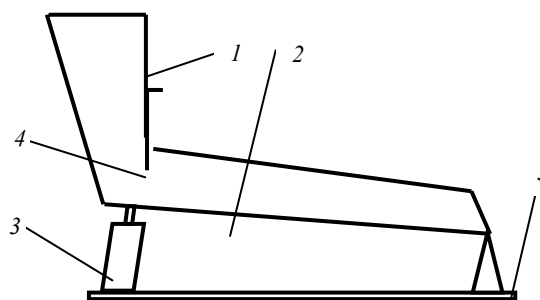


Рис. 3.12. Вибрационный питатель

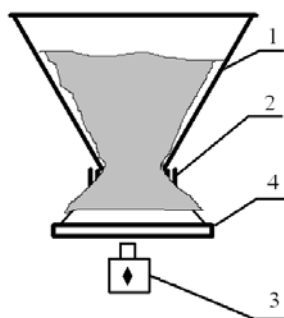


Рис. 3.13. Схема вибрационного питателя

На рисунке 3.13 показана схема вибрационного дозатора, у которого лоток 2 выполнен в виде круглой пластины [10].

Сыпучий материал, высыпаясь из бункера 1, образует конус на пластине 2. Если пластина 2 совершает колебания, то материал высыпается из бункера непрерывным потоком. При неподвижной пластине 2 высыпание не происходит, поскольку расстояние между бункером и пластиной выбирается таким, чтобы угол наклона образующей конуса к горизонту был меньше угла естественного откоса. Колебания пластины осуществляются за счет вибратора 3. Для дозирования материалов с разными углами естественного откоса используется подвижная манжета 4. Для расширения диапазона регулирования производительности дозатора между выходным отверстием и пластиной 2 устанавливают ряд колец, соединенных с этой пластиной. В данном случае при выключенном вибраторе образуется ряд усеченных конусов из сыпучего материала [11]. Расстояния между кольцами выбирают из условий, описанных выше. Основным недостатком вибрационных дозаторов является сравнительно небольшой диапазон регулирования производительности при обеспечении требуемой точности.



Рис. 3.14. Вибрационный лотковый питатель Laborette 24

Немецкая фирма FRITCH GmbH [12] предлагает лотковый питатель "Laborette 24", представленный на рис. 3.14.

В результате вибрации желоба, изготовленного из нержавеющей высококачественной стали, сыпучие вещества равномерно транспортируются из воронки до свободного конца желоба. Производительность может индивидуально регулироваться с помощью отделенного от прибора устройства управления путем изменения амплитуды вибрации. С помощью микропроцессорной электронной системы электромагнит контролирует амплитуду вибрации, обеспечивая тем самым равномерную подачу даже минимальных количеств материала.

Питатель вибрационный ПВ-0,15 [13] предназначен для равномерной подачи с регулируемой производительностью нелипких сыпучих материалов для установки под бункерами на горизонтальных участках материалопроводов в качестве загрузочных устройств дозаторов, мельниц, сит и других технологических аппаратов. Рабочий орган представляет собой трубу круглого сечения, снабженную загрузочным патрубком. Рама предназначена для крепления двигателя и упругих связей. Торсионы предназначены для работы в качестве упругих связей и представляют собой трубы. Двигатель работает в колебательно-вращательном режиме. Колебания передаются рабочему органу через рессоры. Тяги обеспечивают упругую подвеску питателя к бункеру. Регулирование производительности осуществляется путем изменения напряжения питания двигателя с помощью пульта управления. Питатели типа ПВ рекомендуются для применения на предприятиях химической, металлургической, пищевой и других отраслей промышленности. Преимуществами вибрационных питателей типа ПВ являются возможность плавного регулирования производительности, доступность комплектующих изделий (в качестве вибровозбудителя применен стандартный асинхронный электродвигатель), мгновенное прекращение подачи материала при выключении вибровозбудителя. Основные технические характеристики представлены в табл. 3.5.

3.5. Технические характеристики ПВ-0,15

Показатели	Значение	
	1	2
Производительность (по песку крупностью 0,5...2 мм), м ³ /ч	0,5...6	
Внутренний диаметр рабочего органа, мм	150	
Длина транспортирования, мм	800	
Диаметр разгрузочного патрубка, мм	100	160
Привод – вибратор электромеханический ИВ-127Н	0,12 кВт; 2,5 кН	
Частота колебаний, Гц	12...25	
Материал грузонесущего органа – сталь углеродистая		
Габаритные размеры ($L \times B \times H$), мм	1063 × 360 × 676	
Масса, кг	51	51,5

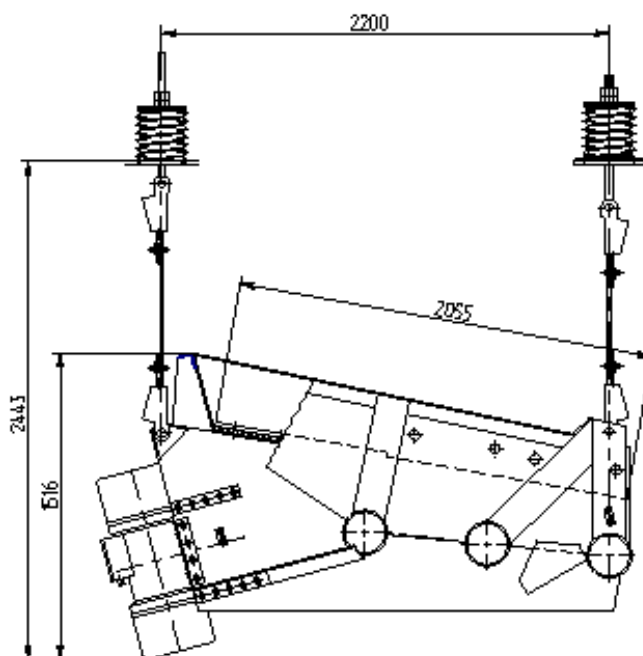


Рис. 3.15. Схема питателя вибрационного бункерного
3.6. Технические характеристики питателя ПВБ-2,4/2

Наименование		Значение
Ширина короба, мм		2410
Длина короба, мм		2055
Площадь обезвоживающего сита, м ²		2,88
Производительность, м ³ /ч, не менее (при угле наклона днища короба 7...10°)		445
Вибратор (2 шт.)	Вынуждающая сила, кН (кгс)	78,9(8043)
	Мощность двигателя, кВт	7,05
Габаритные размеры (без учета подвесок)	Длина, мм	2610
	Ширина, мм	2580
	Высота, мм	1516
Масса, кг		3270

Питатель вибрационный бункерный ПВБ-2,4/2 [14], схема которого показана на рис. 3.15, предназначен для разгрузки из бункера и обезвоживания сыпучих, не склонных к налипанию материалов крупностью не более 20 мм и насыпным весом не более 2 т/м³ при температуре окружающей среды от 273 до 313 К (от 0 до 40 °С).

Основные технические характеристики данного питателя представлены в табл. 3.6.

Питатели вибрационные с активатором ПВА [15] предназначены для разгрузки из бункеров неналипающих сыпучих материалов крупностью не более 20 мм, с температурой до 353 К (80 °С), склонных к сводообразованию, при температуре окружающей среды от 283 до 313 К (от 10 до 40 °С).

Разработаны три типоразмера: ПВА-0,45, ПВА-0,9, ПВА-1,2, основные характеристики которых представлены в табл. 3.7.

Группа качающихся **питателей типа ПК-0,2 и ПК-0,4** [16, 17] предназначены для выгрузки из бункера материалов крупностью до 150 и 250 мм соответственно и состоят из корпуса, относительно которого совершает возвратно-поступательное движение стол, установленный на катковых опорах. Опоры стола и привод закреплены на корпусе питателя.

3.7. Техническая характеристика питателей ПВА

Наименование	Значения		
	ПВА-0,45	ПВА-0,9	ПВА-1,2
Диаметр выпускного отверстия бункера, мм	450	900	1200
Производительность, м ³ /ч*	1,5...5	5...10	не более 40
Мощность двигателя, кВт	0,18	0,37	1,5
Габаритные размеры (L × B × H), мм	600 × 535 × 810	1010 × 660 × 1320	1711 × 1470 × 774
Масса, кг	85	155	318

* Производительность ПВА-0,45 и ПВА-0,9 указана для песка, производительность ПВА-1,2 – для материалов типа муки, комбикормовой смеси.

3.8. Технические характеристики качающихся питателей

Показатели	Значения	
	ПК-0,2	ПК-0,4
Производительность, м ³ /ч*	0,1	1,8
Длина транспортирования, мм	424	800
Проходное сечение, мм:		
ширина	200	400
высота	160	250
Амплитуда качания стола, мм	26	120
Число качаний в мин	2,5	2...3
Мощность двигателя, кВт	0,25	0,25
Габаритные размеры ($L \times B \times H$), мм	1237 × 730 × 57 2	1665 × 740 × 58 5
Масса, кг	200	300

* Производительность питателей этого типа может быть установлена под требования заказчика.

При прямом ходе стола лежащий на нем слой материала увлекается в сторону движения трением. При этом из бункера в образовавшееся свободное пространство поступает новая порция материала, заполняя его. При обратном ходе вследствие подпора, образуемого задней неподвижной стенкой бункера, материал не движется назад и частично ссыпается через переднюю грань стола. Характеристики питателей сведены в табл. 3.8.

3.5. ТРУБЧАТЫЕ ПИТАТЕЛИ

Основным рабочим элементом трубчатых устройств для подачи и дозирования сыпучих материалов является вращающаяся труба. Экспериментальные исследования [18] показали, что равномерность подачи материала трубой, а следовательно, и точность дозирования выше равномерности подачи материала, например, шнеком или транспортером. Повышение равномерности подачи сыпучих материалов вращающейся трубой достигается, прежде всего, за счет стабилизации насыпной плотности материала при его движении в трубе. Вращающаяся труба обладает высокой сглаживающей способностью, т.е. возмущения на входе, возникающие в результате неравномерной подачи материала, в процессе движения во времени накладываются друг на друга, и в конечном счете разность между мгновенной и средней производительностями уменьшается. В настоящее время выделяют две группы трубчатых устройств для подачи и дозирования сыпучих материалов [18]:

- 1) трубчатые питатели и дозаторы;
- 2) трубчатые распределители порций.

В свою очередь, можно выделить два основных типа трубчатых питателей и дозаторов:

- 1) с неподвижным бункером;
- 2) с вращающимся бункером.

Трубчатый питатель с неподвижным бункером (рис. 3.16) содержит трубу 1, размещенную в бункере 2.

Для подачи плохо сыпучих материалов, налипающих на поверхность трубы, предложено использовать струну 3, срезающую налипший материал [19]. Для исключения застойных зон в бункере используют ворошитель 4 с приводом вращения.

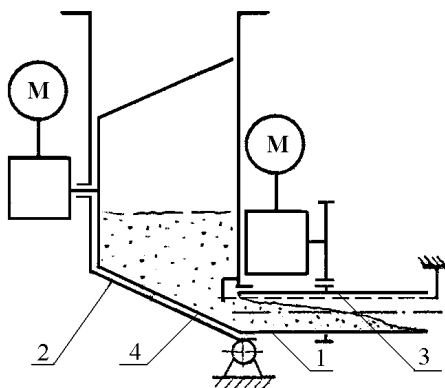


Рис. 3.16. Схема дозатора с неподвижным бункером

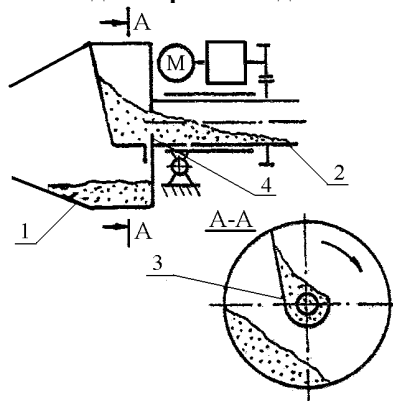


Рис. 3.17. Схема дозатора с вращающимся бункером

В дозаторе, бункер *1* которого вращается вместе с трубой *2* приводом [20] (рис. 3.17), подача материала в трубу осуществляется периодически лопастью через загрузочный узел *3*. Расход материала можно регулировать углом наклона оси трубы к горизонту, угловой скоростью ее вращения и диафрагмой *4* на выходе трубы.

С целью уменьшения влияния уровня сыпучего материала в бункере на точность дозирования предложено устройство [21], в котором бункер вращается с угловой скоростью, отличной от скорости вращения трубы. На внутренней поверхности бункера установлены лопасти, которые подают материал через неподвижную воронку во вращающуюся трубу. Поскольку излишки материала из воронки ссыпаются в бункер, в нем поддерживается постоянный уровень материала, что благоприятно влияет на точность дозирования.

Известны конструкции, в которых используется комбинация указанных типов устройств [22].

Устройства с вращающимся бункером более энергоемки, однако именно они позволяют получить более высокую точность дозирования за счет того, что материал в результате постоянного пересыпания имеет более стабильную насыпную плотность. Применение данных дозаторов экономически оправдывается, особенно в случаях, когда нужно обеспечить малую производительность при достаточно высокой точности дозирования.

На базе трубчатых питателей с неподвижным бункером разработаны конструкции дозаторов и дозаторов-смесителей [23], позволяющие одновременно дозировать от двух до шести компонентов.

Производительность трубчатого дозатора можно рассчитать по формуле [18], полученной в результате исследований процесса дозирования [24]:

$$Q = k\rho\omega d^3, \quad (3.6)$$

где k – коэффициент подачи; ρ – насыпная плотность сыпучего материала, г/см^3 ; ω – угловая скорость вращения трубы, с^{-1} ; d – внутренний диаметр трубы, см.

Значения коэффициентов подачи для гладких цилиндрических труб и труб, диафрагмированных на входе, приведены соответственно в табл. 3.9, 3.10 [18].

Экспериментальные исследования показали удовлетворительную сходимость в расчетных экспериментальных данных [24]. Значения коэффициента подачи могут быть использованы для расчетов основных параметров дозатора на стадии проектирования. Окончательный вывод дозатора на заданную производительность может быть осуществлен изменением угла наклона трубы или диаметром диафрагмы.

3.9. Расчетные значения коэффициента подачи K в зависимости от угла наклона трубы α , угла естественного откоса φ , относительной длины трубы λ

λ	α , град	$K \cdot 10^2$				
		φ , град				
		30	34	38	42	46
5	-5	1,17	0,77	0,62	0,47	0,28
	-3	1,51	1,06	0,83	0,77	0,40
	0	2,33	1,65	1,22	1,12	1,08
	3	3,02	2,37	2,01	1,75	1,68
	5	3,72	2,97	2,48	2,40	2,15
	10	6,03	4,83	4,13	3,52	3,13
10	-5	0	0	0	0	0
	-3	0,38	0,30	0,25	0,23	0
	0	0,90	0,77	0,62	0,53	0,48
	3	1,68	1,47	1,32	1,25	1,15
	5	2,21	1,98	1,87	1,58	1,32
	10	4,01	3,42	2,97	2,82	2,40

$\lambda = L/d$, где d – диаметр трубы, L – длина трубы.

3.10. Расчетные значения предельного коэффициента подачи K в зависимости от угла естественного откоса φ , угла наклона α и относительной длины λ трубы с диафрагмой на входе

λ	α , град	$K \cdot 10^2$				
		φ , град				
		30	34	38	42	46
5	0	0,93	0,78	0,65	0,54	0,45
	3	1,45	1,36	1,21	1,08	0,99
	5	2,22	1,83	1,64	1,40	1,21
	10	4,01	3,62	3,18	2,74	2,40
10	0	0,43	0,36	0,31	0,26	0,23
	3	1,20	1,07	0,98	0,88	0,81
	5	1,79	1,55	1,34	1,16	0,99
	10	3,41	2,96	2,61	2,28	2,00

$d_d / d = 0,5$, где d_d – диаметр диафрагмы.

Трубчатые распределители порций обеспечивают равномерное распределение порций по длине вращающейся трубы и могут быть использованы для получения непрерывного потока при синхронной работе распределителя и транспортирующего устройства, а также для равномерной загрузки сыпучих материалов в технологические устройства, например в смеситель периодического действия [25]. Время заполнения трубчатого распределителя материалом может быть найдено по зависимостям, приведенным в работе [26], а время, необходимое для равномерного распределения материала по длине трубы, может быть оценено по результатам работы [27].

Наклоненные вращающиеся трубы используются также для усреднения и дозирования сыпучих материалов [28].

Как видно из приведенных материалов, трубчатые устройства могут быть использованы как для порционного, так и для непрерывного дозирования.

3.6. ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПИТАТЕЛИ

Питатели, в которых дозируемый материал движется только под действием собственного веса, можно отнести к гравитационным питателям. Эти питатели наиболее просты в конструктивном исполнении и наименее энергоемки. Типичным является гравитационный питатель [29], предназначенный для загрузки сыпучих материалов в герметичные емкости (рис. 3.18).

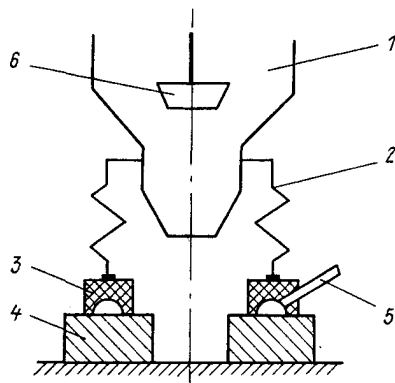


Рис. 3.18. Гравитационный питатель

Устройство состоит из герметичного бункера 1, соединенного сифоном 2 через кольцевое уплотнение 3 с загрузаемой емкостью 4. Для обеспечения герметичности соединения загрузаемой емкости с бункером предусмотрено подключение кольцевого уплотнения к вакуум-наосу через патрубок 5. Прекращение цикла дозирования осуществляется затвором 6.

Преимущества питателя заключаются в возможности обеспечения плавного регулирования расхода без изменения диаметра выпускного патрубка путем перемещения стабилизирующей трубки вдоль вертикальной оси.

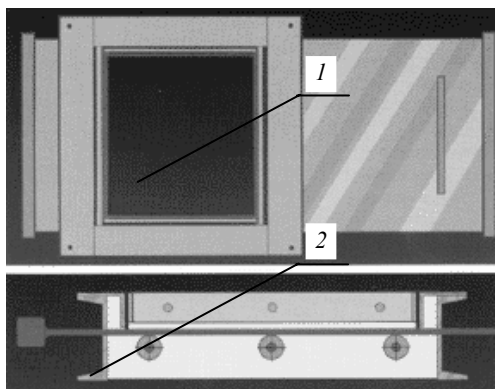


Рис. 3.19. Схема питателя с ручным перемещением шибера

Особенно широко используются на практике питатели "slide gate" – скользящий затвор или скользящие ворота. На рисунке 3.19 показана самая простая конструкция питателя, в которой шибер 1 перемещается вручную. Для уменьшения усилия, необходимого для перемещения шибера, установлены ролики 2.

Известны конструкции, в которых для перемещения шибера используется реечная зубчатая передача. Для перемещения шибера также используются пневмо- и гидроцилиндры, что позволяет не только исключить ручной труд, но и автоматизировать процесс. Типичная конструкция показана на рис. 3.20. Пример использования питателей данного типа показан на рис. 3.21. На практике используются также питатели с криволинейным шибером (рис. 3.22).

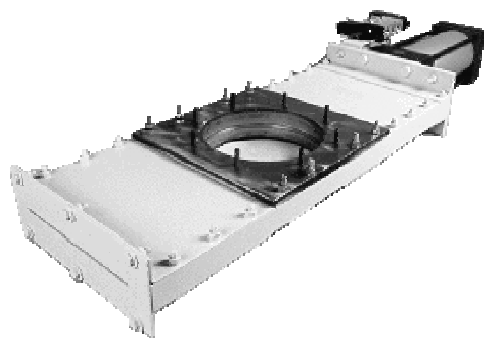


Рис. 3.20. Питатель с гидроцилиндром

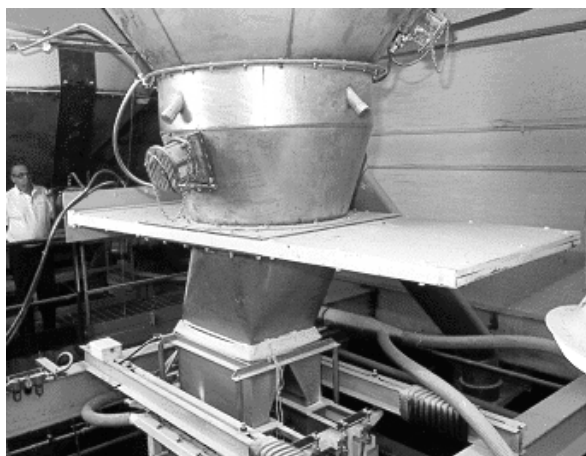


Рис. 3.21. Пример использования гравитационных питателей в промышленности

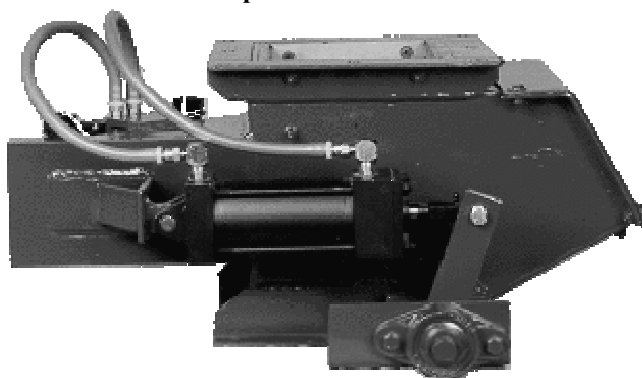


Рис. 3.22. Питатель с криволинейным шибером

Гравитационные питатели имеют ряд существенных недостатков: ограниченная возможность регулирования расхода сыпучего материала с одновременным обеспечением заданной точности; достаточно сильная зависимость производительности питателя от влажности дозируемого материала; заклинивание шиберов в результате попадания дозируемого материала в зазоры между подвижным шибером и неподвижными направляющими корпуса питателя.

К гравитационным питателям можно отнести диафрагменные затворы, которые выпускает Kemutec Group Ltd. [30]. Эти затворы выпускаются различных модификаций, как с ручным приводом, так и с механическим.

3.7. ПИТАТЕЛИ С ЭЛАСТИЧНЫМ РАБОЧИМ ОРГАНОМ

Для непрерывной подачи дисперсных материалов, в том числе и плохосыпучих, используют питатели с эластичным рабочим органом (рис. 3.23) [31].

Устройство содержит цилиндрический эластичный рукав 1, верхний фланец 2, пружины 3, нижний фланец 4, вибраторы 5 вертикальной вибрации, бункер 6, эластичный элемент 7, течку 8, транспортер 9. На

внутренней поверхности цилиндрического эластичного рукава шарнирно закреплены лопатки 10 или кольцевые утолщения 11.

Устройство работает следующим образом. Верхняя часть предварительно натянутого рукава заполняется дозируемым материалом. Затем включаются в работу вибраторы, ход которых для различных материалов составляет от 25 до 100 мм, а частота импульсов 50 – 80 колебаний в минуту. Суммарная жесткость пружин 3 подбирается из расчета 0,4...0,7 от жесткости цилиндрического эластичного рукава 1, их ход – 0,3...0,5 от хода вибраторов 5 вертикальной вибрации, и при движении последних вверх сначала происходит "заглатывание" материала за счет увеличения диаметра цилиндрического эластичного рукава 1 и образование разрежения. При этом благодаря наличию кольцевых утолщений 11 или лопаток 10 уменьшается вероятность возврата дозируемого материала из нижней части цилиндрического эластичного рукава 1. Затем за счет пружин 3 происходит перемещение всего цилиндрического эластичного рукава вверх. При движении вибраторов 5 вертикальной вибрации вниз сначала весь цилиндрический эластичный рукав 1 движется вниз, увлекая за собой материал, а когда ход пружин 3 выбран, деформируется грузонесущий орган. Таким образом, подача материала на транспортер 9 через точку 8 происходит как при движении вибраторов 5 вертикальной вибрации вверх, так и при движении вибраторов вниз.

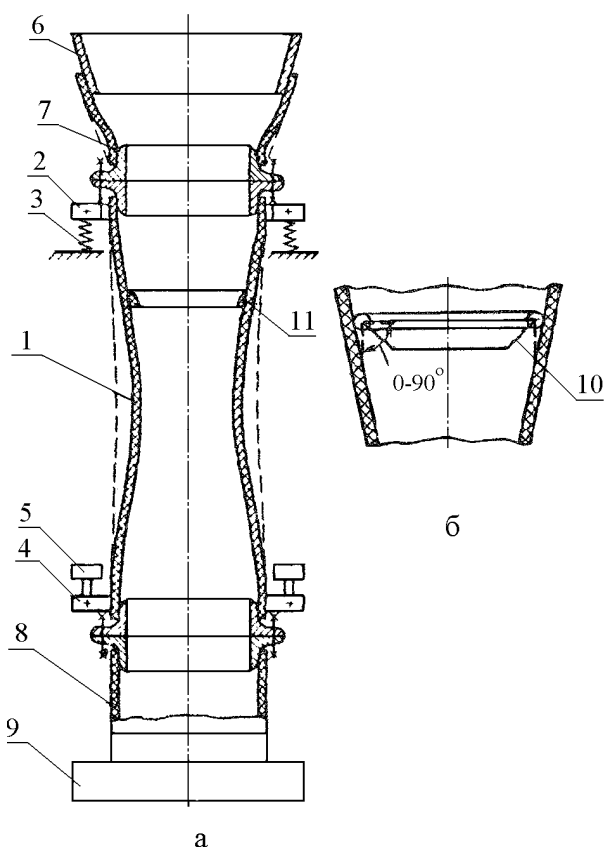


Рис. 3.23. Устройство для непрерывного дозирования:
а – с кольцевыми утолщениями; б – с лопатками

3.8. ТАРЕЛЬЧАТЫЕ ПИТАТЕЛИ

Тарельчатые или дисковые питатели используются обычно для сыпучих материалов. Материал под действием сил тяжести из бункера подается на вращающуюся тарелку 1 (рис. 3.24) и на каждом обороте тарелки часть материала удаляется с помощью скребка 4. Регулирование производительности осуществляется за счет подъема или опускания манжеты 2, с помощью механизма 3 либо за счет поворота скребка 4. Ориентировочно производительность дискового питателя может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Q = 60\pi\rho h n (R^2 - r^2), \quad (3.7)$$

где Q – производительность, кг/ч; ρ – насыпная плотность дозируемого материала, кг/м³; h – высота скребка, м; n – скорость вращения тарелки, об/мин; R – радиус тарелки, м; r – расстояние от оси вращения тарелки до края скребка, м.

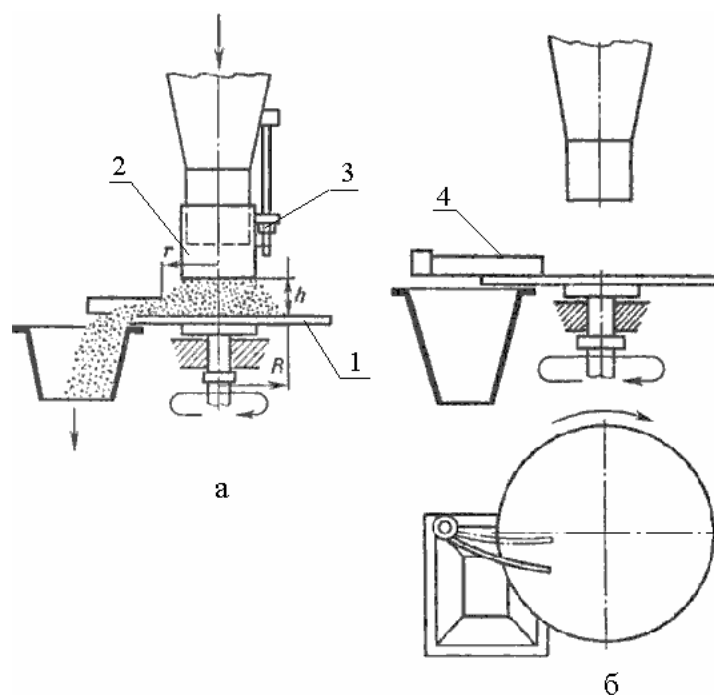


Рис. 3.24. Тарельчатый питатель с регулированием производительности путем подъема или опускания обоймы (а) либо поворотом скребка (б):

1 – тарелка; 2 – обойма; 3 – механизм перемещения обоймы; 4 – скребок

Окончательно вопрос о производительности питателя решается в процессе пуско-наладочных работ, поскольку производительность зависит от углов и коэффициентов трения, текучести сыпучего материала и т.д.

В России тарельчатые питатели выпускает несколько предприятий, в частности Агентство прикладной механики [32] предлагает питатели, представленные в табл. 3.11.

Серия тарельчатых питателей ТП-АПМ предназначена для непрерывной и точной загрузки и разгрузки любых сыпучих материалов. Тарельчатые питатели ТП-АПМ характеризуются высокой надежностью, простотой настройки и регулировок. Герметичное исполнение позволяет использовать тарельчатые питатели без системы аспирации и с применением инертных сред. Регулируемая скорость вращения позволяет менять производительность тарельчатых питателей. Возможно изготовление тарельчатых питателей с собственным бункером или под бункер заказчика. Варианты приводов тарельчатых питателей: мотор-редуктор с частотным преобразованием скорости; мотор-редуктор с ременной передачей и регулировкой скорости смены шкивов.

3.11. Технические характеристики тарельчатого питателя

Марки питателя	ТП-АПМ-1/0.5,300	ТП-АПМ-2/0.8,450	ТП-АПМ-3/1,450
Габариты, мм: $L \times B \times H$	250 × 250 × 250	500 × 350 × 400	750 × 550 × 800
Масса в зависимости от исполнения, кг	от 9 до 20	от 30 до 56	от 70 до 140
Потребляемая мощность, Вт	до 200	до 700	до 1500
Напряжение питания	380/220	380	380
Крупность материала, мм	до 20 мм	до 25 мм	до 35 мм
Производительность, кг/ч	от 20 до 1500	от 1500 до 5000	от 4000 до 12 000
Погрешность, г/ч	до 150	до 250	до 1000



Рис. 3.25. Питатель тарельчатый ПТ-2000

ЗАО "Новосибирский испытательный центр" [33] предлагает питатель тарельчатый ПТ-2000 (рис. 3.25). Он предназначен для обеспечения производственного процесса равномерной подачи сыпучих материалов в заранее установленных нормах ведения технологического процесса количественных соотношениях для предприятий горнорудной, химической, строительной и других отраслей промышленности.

В производстве керамики используются тарельчатые питатели [34], схема которых представлена на рис. 3.26.

3.12. Технические характеристики питателя ПТ-2000

Наименование основных параметров	Норма
Производительность по кварцевому песку, кг/ч	5...1000
Наибольший размер кусков загруженного материала, мм	10...15
Ширина загрузочной щели (размер между шибером и тарелкой), мм	5...50
Габаритные размеры, мм (длина × ширина × высота)	1015 × 840 × 1140
Масса, кг (не более)	200

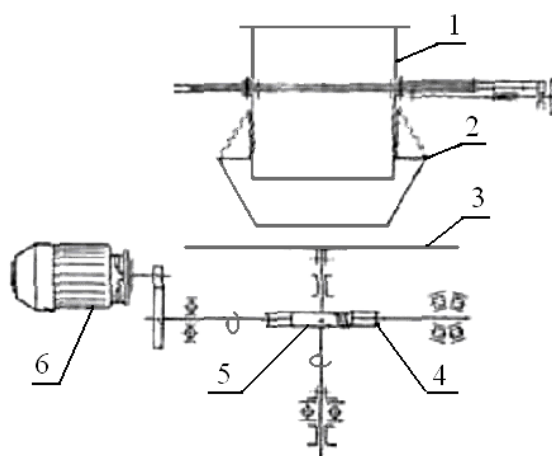


Рис. 3.26. Кинематическая схема тарельчатого питателя:
 1 – направляющий патрубок; 2 – бункер; 3 – вращающаяся тарелка;
 4 – шестерня; 5 – червячное колесо; 6 – электродвигатель

Тарельчатые питатели подвешивают к бункеру с сырьем либо монтируют на станине. В последнем случае подвешивают направляющий патрубок. Порошок через направляющий патрубок поступает в бункер 2 и отсюда на вращающуюся тарелку 3, на которую порошок ложится в форме конуса. При вращении посредством привода нож сбрасывает порошок в расходную тещку.

Производительность тарельчатого питателя зависит от диаметра и числа оборотов тарели, объема усеченного конуса дозируемого материала на тарели, высоты и положения скребка. Технические характеристики тарельчатых питателей приведены в табл. 3.13.

3.13. Технические характеристики тарельчатых питателей

Показатели	СМ-86	АСМ-179	АСМ-274	АСМ-276А
Производительность, м ³ /ч	1,5	3,0	10,0	10,0
Диаметр тарелки, мм	500	750	1000	1000
Скорость тарелки, об/мин	4,27	4,19	7,0	7,0
Мощность электродвигателя, кВт	0,6	0,61	1,0	1,0
Габаритные размеры, мм:				
длина	1065	1120	1945	1950
ширина	500	770	1480	1500
высота	904	837	1065	1446
Масса, кг	215	231	790	825

Компания "АкмеТехнология" [35] предлагает питатель тарельчатый ПТ-25 (рис. 3.27), который предназначен для равномерной дозированной подачи сыпучих материалов в различные технологические процессы, аппараты. Исходя из технических характеристик (табл. 3.14), питатель тарельчатый может использоваться в производстве материалов и пигментов в лакокрасочном производстве, производстве строительных материалов, компонентов сухих строительных смесей, химическом производстве, переработке минерального сырья, руд, концентратов, вторсырья и т.п.



Рис. 3.27. Питатель тарельчатый ПТ-25

3.14. Технические характеристики питателя ПТ-25

Показатели	Значения
Производительность, т/ч	0,2...2
Крупность продуктов, мм	до 25
Установленная мощность, кВт	2
Габаритные размеры, мм:	
длина	420
ширина	700
высота	400
Масса, кг	70

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roberts, A.W. Mechanical transport in bulk solids processing and handling / A.W. Roberts // International symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III). – Porsgrunn, Norway, August, 1999. – P. 567 – 616.
2. Volumetric Belt Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vibrascrewinc.com/pvol-volumetric_belt_feeders.shtml, свободный.

3. Volumetric Belt Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vibrascrewinc.com/pvol-volumetric_belt_feeders.shtml, свободный
4. Филимонов, Д.В. Расчет производительности шнековых и спиральных питателей / Д.В. Филимонов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 64 – 68.
5. Schlesinger, D. Screw machines analysis of work and design calculations / D. Schlesinger & A. Papkov, Dafna Eng. Ltd. // International symposium Reliable flow of particulate solids III (RELPOWFLO III). – Porsgrunn, Norway, August, 1999. – P. 849 – 855.
6. Source for Feeding. Single screw Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.process-controls.com/separators/ktron_soder_volumetric_feeders.html, свободный.
7. Low Rate Screw Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.vibrascrewinc.com/pvol-lowrate_screw_feeders.shtml, свободный.
8. Питатель ВП-200 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mnt.kirov.ru/kv.html>, свободный.
9. Питатель реверсивный шнековый ПРШ – 0,25 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consit-a.ru/customers/oborudovanie/pitateli/prsh.html>, свободный.
10. Питатель секторный ПС-1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tlnh.ru/index-112.htm>, свободный.
11. Yu, Y. Theoretical and Experimental Study on the Volumetric Efficiency of Screw Feeders / Y. Yu, P.C. Arnold // Powder handling and processing, 1996. – Vol. 8. – N. 3. – P. 207 – 214.
12. Metcalf, J.R. The Mechanics of the Screw Feeders / J.R. Metcalf // Proc. Instn. Mech. Ingrs. 1966. – Vol. 180. – N. 6. – P. 131 – 146.
13. Вибрационный лотковый питатель laborette 24 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neosib.ru/catalogue/fritsch/additional-devices/laborette24.html>, свободный.
14. Питатель вибрационный ПВ 0,15 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://consit.ru/03obor_pitel_v_015.shtml, свободный.
15. Питатель вибрационный бункерный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consit.ru/pub_24_2.html, свободный.
16. Питатели вибрационные с активатором ПВА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consit-a.ru/customers/oborudovanie/pitateli/pva.html>, свободный.
17. Питатель качающийся ПК-0,2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consit-a.ru/customers/oborudovanie/pitateli/pk_02.html, свободный
18. Питатель качающийся ПК-0,4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consit-a.ru/customers/oborudovanie/pitateli/pk_04.html, свободный.
19. Репкин, Ю.А. Трубчатые устройства для подачи и дозирования сыпучих материалов / Ю.А. Репкин // Разработка, исследование оборудования для получения гранулированных материалов : сб. науч. тр. – М. : МИХМ, 1985. – С. 52 – 57.
20. А. с. 964462 СССР, МКИ⁵ G 01 F 11/24. Трубчатый микропитатель для сыпучих и порошкообразных материалов / Ю.А. Репкин, А.И. Целиковская, В.А. Самсонов (СССР). – № 2952796 ; заявл. 09.07.80 ; опубл. 07.10.82, Бюл. № 37. – С. 122.
21. А. с. 741933 СССР, МКИ⁵ B 01 J 3/02. Питатель для сыпучих материалов / Ю.А. Репкин, В.Д. Довженко, И.З. Скрыпник, В.Ф. Удальцов (СССР). – № 1843719 ; заявл. 09.11.72 ; опубл. 25.06.80, Бюл. № 23. – С. 175.
22. А. с. 838365 СССР, МКИ⁵ G 01 F 11/24. Трубчатый микропитатель для сыпучих и порошкообразных материалов / Ю.А. Репкин, В.А. Самсонов, А.И. Целиковская (СССР). – № 2718212 ; заявл. 29.01.79 ; опубл. 15.06.81, Бюл. № 22. – С. 139.
23. А. с. 1060540 СССР, МКИ⁵ B 65 B 3/06. Устройство для дозирования легкоплавких материалов / Ю.А. Репкин, Г.В. Вишняков, А.И. Швайцер, Р.К. Бауман (СССР). – № 3390594 ; заявл. 26.01.82 ; опубл. 15.12.83, Бюл. № 46. – С. 151.
24. А. с. 1009787 СССР, МКИ⁵ B 29 B 5/06. Устройство для непрерывного дозирования и перемешивания сыпучего полимерного материала / Ю.А. Репкин, М.И. Конов, А.И. Сильченков (СССР). – № 3406972 ; заявл. 15.03.82 ; опубл. 07.04.83, Бюл. № 13. – С. 135.
25. Вишняков, Г.В. К расчету расходных характеристик трубчатого питателя / Г.В. Вишняков, Ю.А. Репкин // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств : сб. науч. тр. – М. : МИХМ, 1984. – С. 85 – 94.
26. А. с. 690314 СССР, МКИ⁵ G 01 G 11/00, G 05 D 7/03. Распределитель порошкообразного материала для весовых дозаторов непрерывного действия / Ю.А. Репкин (СССР). – № 2514110 ; заявл. 27.07.77 ; опубл. 05.10.79, Бюл. № 57. – С. 165.
27. Квасова, А.Г. Движение фронта сыпучего материала во вращающемся трубчатом питателе / А.Г. Квасова, Ю.И. Гусев // Разработка, исследование оборудования для получения гранулированных материалов : сб. тр. – М. : МИХМ, 1985. – С. 58 – 62.
28. Рассказов, Н.И. Движение сыпучего материала во вращающейся трубе распределителя порций / Н.И. Рассказов, Ю.А. Репкин, В.Ф. Удальцов // Сб. науч. трудов. – М. : МИХМ, 1978. – Вып. 9. – С.145.

29. Вишняков, Г.В. К расчету расходных характеристик трубчатого питателя / Г.В. Вишняков, Ю.А. Репкин // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств : сб. науч. тр. – М. : МИХМ, 1984. – С. 85.
30. Деревякин, Н.А. Современное оборудование для подачи сыпучих материалов / Н.А. Деревякин, Е.Н. Капитонов // Обзорная информация. – М. : ЦНИИТИхимнефтемаш, 1988.
31. Powder Handling Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kemutec.com/>, свободный.
32. А. с. 1174759 СССР, МКИ⁴ G 01 F 13/00. Устройство для непрерывного дозирования / В.Ф. Першин, Н.А. Деревякин, В.П. Таров, А.Г. Ткачев. – № 3728120/24-10 ; заявл. 11.01.84 ; опубл. 23.08.85, Бюл. № 31. – 2 с.
33. Тарельчатые питатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.apmech.ru/ob-tarpit.htm>, свободный.
34. Питатель тарельчатый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://alexnovic.rusmarket.ru/>, свободный.
35. Тарельчатые питатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://keramp.ru/>, свободный.
36. Питатель тарельчатый [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://akmetech.ru/39/>, свободный.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Основными элементами измерительной системы являются: механическая система, передающая усилие от материала на чувствительный элемент; датчик силы или перемещения.

4.1. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Механическая система, передающая усилие от материала, подлежащего взвешиванию, на чувствительный элемент датчика зависит от способа дозирования и конструкции дозатора.

Наиболее простой вариант передачи усилия от материала, подлежащего взвешиванию, на весоизмерительный датчик, показан на рис. 2.7. Данному способу присущи следующие недостатки. Во-первых, на весоизмерительную платформу установлен ленточный транспортер, а поскольку вес транспортера, как правило, намного больше веса материала, находящегося на ленте, возникают существенные погрешности при определении производительности и точности дозирования. Во-вторых, вес материала, а следовательно, и производительность можно определить только с дискретностью времени $\Delta t = L/v$, где L – длина ленты транспортера, на которой находится материал; v – скорость движения ленты. За меньшие промежутки времени производительность и точность дозирования рассчитать нельзя, поскольку неизвестно распределение материала на ленте.

Известны также конструкции, в которых только один край транспортера установлен на весоизмерительную платформу (см. рис. 2.8, б, в). В этом случае при расчете производительности и точности дозирования делают допущение о равномерном распределении материала на ленте [1]. Аналогичное допущение делают при расчете дозатора, схема которого показана на рис. 4.1.

Измерение веса материала осуществляется на участке транспортерной ленты между опорными роликами 1, 2 через весовой ролик 3, который передает усилие на весовой датчик 4. Сигнал с датчика 4 передается на контроллер 5. Одновременно на контроллер поступает информация о скорости движения ленты с датчика 6. Контроллер рассчитывает производительность дозатора, сравнивает с заданными значениями и, при необходимости, подает управляющий сигнал на привод шнекового питателя 7.

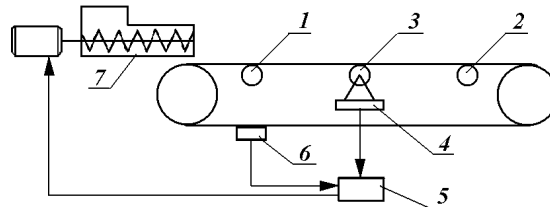


Рис. 4.1. Схема ленточного дозатора

В общем виде производительность весового дозатора W_T можно определить следующим образом:

$$W_T = \int_T^{T+\Delta T} Q(t) V dt. \tag{4.1}$$

Одним из ключевых элементов весового моста является ролик (или ролики), который воспринимает нагрузку со стороны ленты. На рисунке 4.2 показана схема действия сил на весовой ролик.

Весовой датчик 4 регистрирует только вертикальную составляющую $F_{\text{вер}}$ силы F . Однако численное значение F , а следовательно, и $F_{\text{вер}}$ зависит не только от веса материала, находящегося на ленте, но и от горизонтальной силы $F_{\text{гор}}$. Предположим, что слева от ролика материала больше, чем справа, и лента провиснет, как это показано пунктирной линией на рис. 4.2. Очевидно, что в данном случае существенно возрастает сила $F_{\text{гор}}$, поэтому одной из основных задач при проектировании ленточных весовых дозаторов является создание конструкции весового моста с минимальными горизонтальными и динамическими силовыми воздействиями на весовой ролик (или ролики) и максимальным вертикальным воздействием от веса материала, находящегося на ленте. На рисунке 4.3 представлены схемы трех основных конструкций весоизмерительных мостов, которые используются в настоящее время: а – простой одношарнирный мост; б – двухшарнирный мост; в – "плавающий" мост.

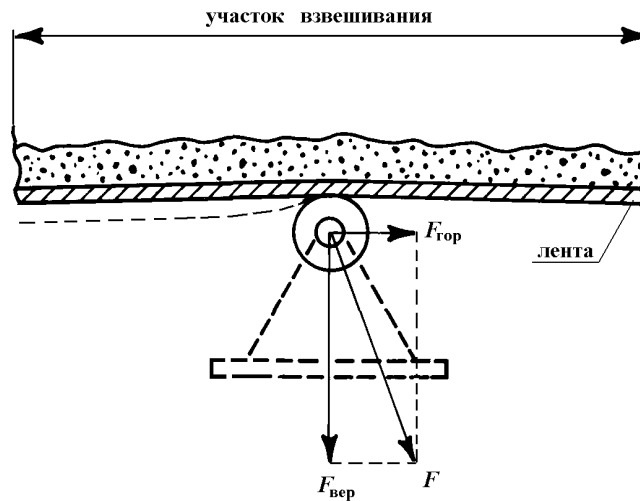


Рис. 4.2. Схема действия сил на весовой ролик

Наиболее простая схема передачи усилия от материала на датчик веса, представленная на рис. 4.1, впрочем, как и другие схемы (см. рис. 4.3), используемые в настоящее время на практике, не позволяет определить функциональную зависимость $q(t)$. Учитывая это, в настоящее время считают, что в момент измерения сыпучий материал равномерно распределен на участке между роликами 1, 2. Вес материала определяется на участке между опорными роликами 1 и 2. Усилие через ролик 3 (рис. 4.3, а) или ролики 3 (рис. 4.3, б, в) передается на датчик веса 4.

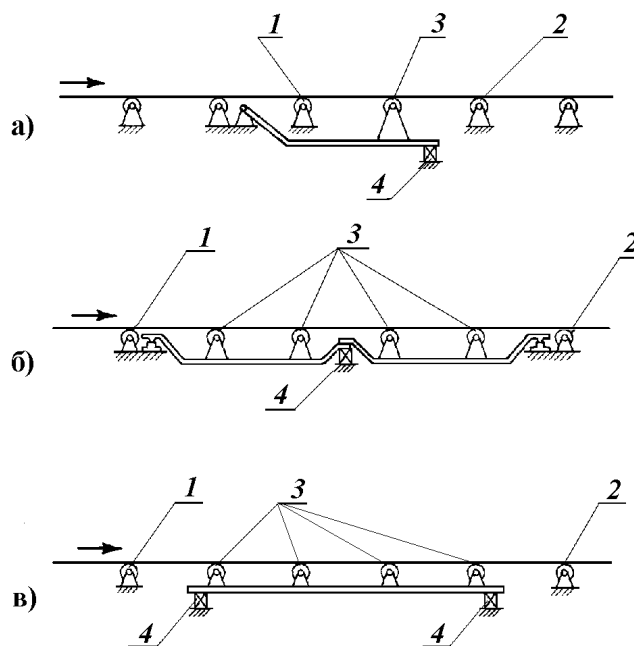


Рис. 4.3. Схемы основных конструкций весоизмерительных мостов

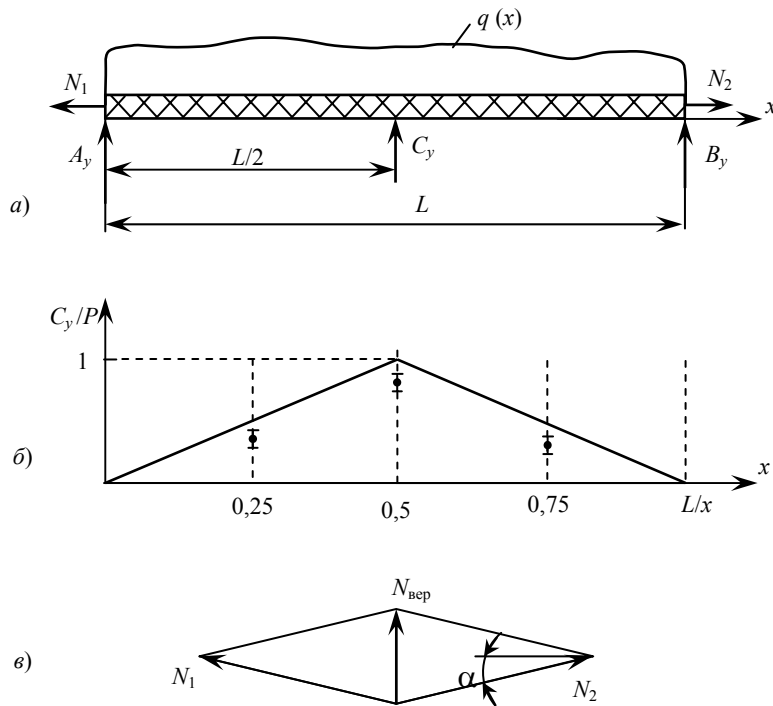


Рис. 4.4. Расчетная схема к определению реакции C_y

Рассмотрим более детально распределение сил на данном участке.

На рисунке 4.4, а показана расчетная схема. На ленту действует вертикальная распределенная сила $q(x)$ от веса материала, которая вызывает вертикальные реакции в опорах A_y , B_y , C_y . В горизонтальном направлении действуют внешние силы N_1 от действия приводного (ведущего) ролика ленточного транспортера и N_2 – от ведомого ролика транспортера. Вертикальная сила $F_{\text{вер}}$, которая фиксируется весовым датчиком б, численно равна реакции C_y .

Для определения C_y были проведены следующие экспериментальные исследования. На ленту транспортера между роликками 1, 2 в разные точки (т.е. при разных значениях x) устанавливали эталонную гирию и измеряли величину реакции C_y . На рисунке 4.4, б сплошной линией показана идеальная зависимость C_y/P от x , а точками – результаты эксперимента. Следует отметить, что $C_y < P$, поэтому $C_y/P < 1$.

Результаты предварительных исследований, которые мы провели с лентами из разных материалов и при различных значениях P и L , позволили сделать следующие выводы:

1. Зависимость C_y/P от x не является линейной.

2. При $x = L/2$ $C_y/P < 1$.

3. Конкретные значения C_y/P при различных значениях x зависят от абсолютных значений P , L , а также от материала ленты и ее натяжения.

Совершенно очевидно, что численное значение C_y/P зависит от распределения материала слева и справа от опорных роликков 1, 2 и динамических воздействий на весовой ролик со стороны движущейся ленты.

Тот факт, что при $x = L/2$ $C_y/P < 1$ можно объяснить, используя схему, показанную на рис. 4.4, в. При воздействии материала на ленту и весовой ролик происходит вертикальное перемещение весового ролика. В результате этого перемещения возникает вертикальная составляющая $N_{\text{вер}}$ от усилий натяжения ролика. Угол $\alpha = \text{arctg}(2\Delta/L)$ и $N_{\text{вер}} = 2N \sin \alpha$. $N_1 = N_2 = N$. Именно на величину $N_{\text{вер}}$ показания весоизмерительного датчика будут меньше, чем P , т.е.

$$C_y = P - N_{\text{вер}} \quad (4.2)$$

Численное значение перемещений Δ зависит от абсолютных значений P и L , а также от упругих реологических свойств материала, из которого сделана лента дозатора.

Для проведения дальнейшего анализа разделим AB на четыре участка длиной $L/4$ и будем считать, что для каждого участка известен коэффициент пересчета усилия P , приложенного в середине участка, в реакцию C_y . Для

анализа причины возникновения ошибки в вычислении веса материала, находящегося на ленте, численное значение переводных коэффициентов K не имеет принципиального значения, главное, что эти значения симметричны относительно точки C , как это показано на рис. 4.5, а.

Определим реакцию C_y , если материал распределен на ленте равномерно и интенсивность распределенной нагрузки q_0 . В данном случае $C_y = 2q_0$. Поскольку суммарный вес материала на ленте равен $4q_0$, коэффициент пересчета показаний прибора в вес материала равен 2. Другими словами, для того чтобы рассчитать вес материала, находящегося на ленте, необходимо показания прибора умножить на 2.

Рассмотрим случай, когда производительность дозатора скачкообразно изменяется от q_0 до q_0N . Через промежуток времени Δt , равный $L/4v$, с момента измерения производительности ситуация будет такой, как показана на рис. 4.5. В этом случае

$$C_y = 0,25q_0N + 1,75q_0. \quad (4.3)$$

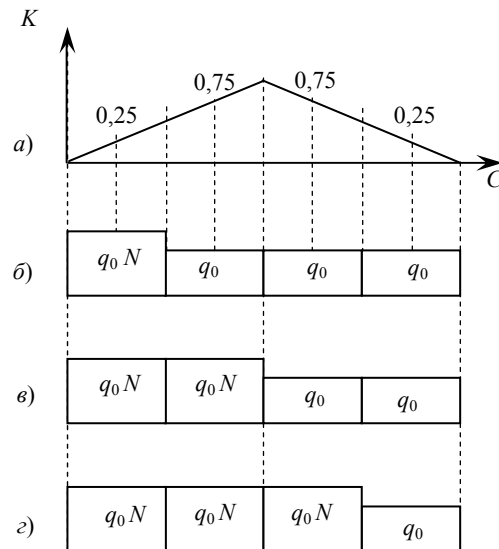


Рис. 4.5. Варианты распределения различных порций материала на ленте

Расчетный вес материала

$$Q = 0,5q_0N + 3,5q_0. \quad (4.4)$$

За данный промежуток времени из дозатора выйдет материал с весом $q_0 \cdot L/4$. Это есть действительная производительность – Q_d . Расчетная производительность Q_p будет равна

$$Q_p = Q/4 = 0,125q_0N + 0,875q_0. \quad (4.5)$$

Ситуация, которая будет через следующий промежуток времени Δt , показана на рис. 4.5, в. В этом случае

$$C_y = q_0N + q_0; \quad Q = 2q_0N + 2q_0;$$

$$Q_d = q_0; \quad Q_p = 0,5q_0N + 0,5q_0.$$

По истечению следующего промежутка Δt (рис. 4.5, г)

$$C_y = 1,75q_0N + 0,25q_0; \quad Q = 3,5q_0N + 0,5q_0;$$

$$Q_d = q_0; \quad Q_p = 0,875q_0N + 0,125q_0.$$

За время $\Delta T = L/v$ действительный суммарный вес материала равен

$$\sum Q_d = 4q_0, \quad (4.6)$$

а расчетный

$$\sum Q_p = 2,5q_0 + 1,5q_0N. \quad (4.7)$$

Ошибка измерения будет равна:

$$\varepsilon = ((4q_0 - 2,5q_0 - 1,5q_0N)/4q_0) \cdot 100\% = 0,375(1 - N) \cdot 100. \quad (4.8)$$

Фактически N – это относительная производительность объемного питателя, т.е. $N = q_n/q_3$, где q_n – производительность объемного питателя, кгс⁻¹; q_3 – заданная весовая производительность дозатора, кгс⁻¹. Таким образом, за счет взвешивания материала, находящегося на ленте, можно зафиксировать и в дальнейшем попытаться исправить отклонения производительности в 2,66 раза меньшие, чем отклонение производительности объемного питателя, который подает материал на ленту дозатора.

Из технической литературы и информационных материалов ведущих мировых фирм, выпускающих объемные питатели, известно, что в отдельных случаях их точность может достигать $\pm 1\%$. Точность лучших образцов весовых ленточных дозаторов составляет 0,25...0,5% [2 – 5]. Сравнение приведенных выше характеристик объемных питателей и весовых ленточных дозаторов подтверждает правильность теоретической оценки возможной точности дозатора при использовании простого одношарнирного весового моста.

Проблема заключается в том, что при одном и том же суммарном весе материала на ленте весовой датчик может регистрировать разные значения усилий и, как следствие, контроллер дает не правильный сигнал корректировки. Данная ситуация показана на рис. 4.6, а и б.

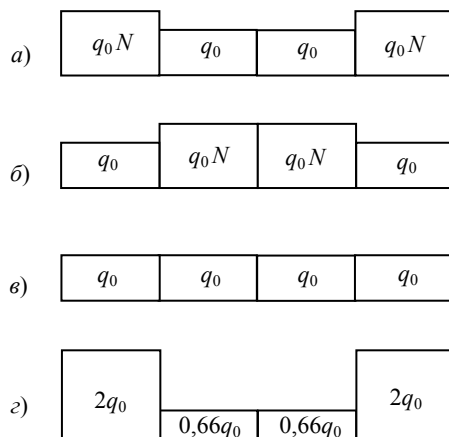


Рис. 4.6. Варианты распределения одинаковых (а, б) и разных (в, з) порций материала на ленте

В то же время возможна и другая ситуация (рис. 4.6, в и з), когда при разном суммарном весе будет зарегистрировано одно и то же усилие.

Следует особо отметить, что повышение точности весового датчика не устраняет рассмотренную причину возникновения ошибки в определении веса материала, находящегося на ленте.

В заключение можно сделать вывод о том, что при использовании простого одношарнирного весового моста в весовых ленточных дозаторах не исключены случаи, когда точность весового дозирования всего лишь в 2,66 раза выше, чем точность объемного питателя, который подает материал на ленту. Одним из перспективных путей повышения точности ленточных дозаторов непрерывного действия является совершенствование устройства для измерения усилия, которым материал действует на весовой датчик, и методики пересчета этого усилия в весовую производительность дозатора.

4.2. ДАТЧИКИ

Рассмотрим принцип работы нескольких датчиков, применяемых для измерения веса или весового расхода. У некоторых материалов наблюдается эффект электрической поляризации, изменяющейся при любой механической деформации материала. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом. Таким образом, непосредственно вес или силу воздействия зернистого материала на весоизмерительное устройство можно измерить с помощью пьезоэлектрических датчиков силы. Другие способы измерения веса или силы основаны на определении смещения (или перемещения) упругого элемента.

Датчики смещения могут измерять как линейный сдвиг (при поступательном движении), так и угол поворота (при вращении). Датчики можно классифицировать в соответствии с используемым принципом преобразования:

омические; емкостные; индуктивные; оптические. Эти механические датчики называются также тензодатчиками или сенсорами.

4.2.1. ОМИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ СМЕЩЕНИЯ

Распространенным типом датчика смещения является потенциометрический датчик. В случае измерения сдвига при поступательном движении он представляет собой в действительности не более чем движковый потенциометр. Для измерения угла поворота при вращении можно применить поворотный потенциометр. Проволочные потенциометры обычно имеют большую точность, меньший температурный коэффициент и т.д. Однако конечная разрешающая способность проволочных датчиков смещения ограничивает их возможности. Недостатком всех датчиков потенциометрического типа является механический износ и химическая коррозия, способные изменить передаточную характеристику датчика в течение его срока службы.

В другом типе резистивного датчика смещения используется тот факт, что электрическое сопротивление проводника зависит от размеров проводника. Сопротивление R является функцией площади поперечного сечения A проводника, его длины l и удельного сопротивления ρ [6]:

$$R = R(A, l, \rho). \quad (4.9)$$

Если проводник механически растягивается или сжимается, то его параметры A , l и ρ изменяются и, как следствие, меняется R . Это дает возможность измерять очень малые перемещения. На рисунке 4.7, а показан отрезок проволоки (тензодатчик), который удлиняется на величину Δl при прикладывании растягивающих усилий. Используя разложение в ряд, можно вычислить чувствительность этого проволочного датчика деформации:

$$R + \Delta R = R(A, l, \rho) + \left(\Delta A \frac{\partial}{\partial A} + \Delta l \frac{\partial}{\partial l} + \Delta \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right) R(A, l, \rho) + \frac{l}{2l} \left(\Delta A \frac{\partial}{\partial A} + \Delta l \frac{\partial}{\partial l} + \Delta \rho \frac{\partial}{\partial \rho} \right)^2 R(A, l, \rho) + \dots \quad (4.10)$$

Если каждая из величин $\frac{\Delta A}{A}$, $\frac{\Delta l}{l}$, $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ меньше 1, а кривизна в точке $R(A, l, \rho)$ мала, то можно пренебречь членами более высоких порядков. Вычитая $R = R(A, l, \rho)$ из обеих частей равенства, получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial A} dA + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho. \quad (4.11)$$

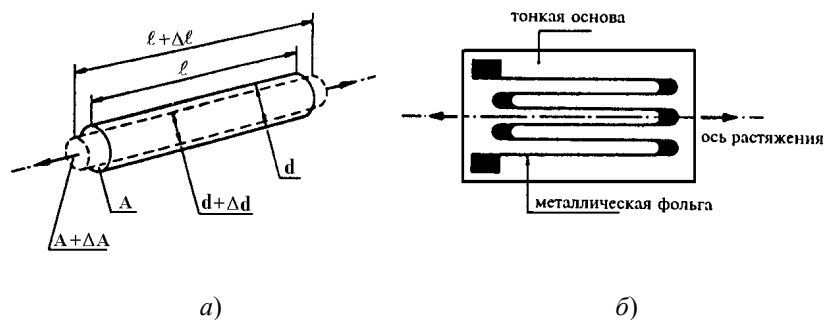


Рис. 4.7. Тензодатчик:

а – свободно висящая растягиваемая проволока;

б – тензодатчик с металлической фольгой

При $\rho = \rho(l)$, $A = A(d)$ и $d = d(l)$ это уравнение принимает вид

$$dR = \frac{\partial R}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial A} dA \quad (4.12)$$

и поэтому

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} \left\{ l \left(\frac{\partial R}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial l} + \frac{\partial R}{\partial l} + \frac{\partial R}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial l} \right) \right\}. \quad (4.13)$$

Множитель в скобках является точным выражением чувствительности S_l^R проволоки к изменению длины. Можно найти величину этой чувствительности, используя следующие соотношения [6]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ (электрическое сопротивление);}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = c \frac{\rho}{l} \text{ (} c \text{ зависит от материала);}$$

$$A = \pi \frac{d^2}{4} \text{ (площадь поперечного сечения);}$$

$$\frac{\partial d}{\partial l} = -\mu \frac{d}{l} \text{ (} \mu \text{ – постоянная Пуассона).}$$

Получаем:

$$S_l^R = 2\mu + 1 + c. \quad (4.14)$$

Для большинства металлов можно предположить, что объем проводника и удельное сопротивление не изменяются при наличии растягивающих или сжимающих усилий (отсутствует пьезорезистивный эффект). Поэтому для металлических тензодатчиков получаем:

$$\frac{dR}{R} = k \frac{dl}{l} \approx 2 \frac{dl}{l}, \quad (4.15)$$

где $k = S_l^R$ – коэффициент чувствительности тензодатчика. Полупроводниковые материалы обычно имеют значение величины k много больше 2. Это связано с тем фактом, что больше не выполняется условие $\partial \rho / \partial l \approx 0$. В этих материалах доминирует пьезорезистивный эффект.

Хотя полупроводниковые тензодатчики обладают очень высокой чувствительностью, они, кроме того, характеризуются сильной нелинейностью и значительным температурным коэффициентом. Как показано на рис. 4.7, б, в тензодатчике полоски металлической фольги, выполненные в виде меандра, сделаны значительно шире в местах поворота для того, чтобы уменьшить чувствительность этого датчика к деформации, направленной перпендикулярно к рабочей оси. Если, кроме величины деформации, мы хотим также измерить направление деформации, то применяется комбинация тензодатчиков, образующих определенную геометрическую структуру, например три тензодатчика, ориентированные под углом 120° один по отношению к другому. Эта конструкция известна под названием "розеточный тензодатчик".

Металлический проводник тензодатчика, его основа и материал конструкции, к которой прикреплен датчик, – все должны иметь один и тот же коэффициент теплового расширения. Если соответствующие коэффициенты не равны, то вследствие изменения температуры будет наблюдаться кажущаяся деформация. Кроме того, дополнительно появится кажущаяся деформация, вызванная отличным от нуля температурным коэффициентом сопротивления используемого материала проводника. Поэтому часто применяют второй тензодатчик, компенсирующий эти эффекты. Второй датчик расположен так, чтобы подвергаться тем же самым (тепловым) возмущениям, но не испытывать никаких усилий (так называемый пассивный или фиктивный тензодатчик, см. рис. 4.8, а). Датчики включены в мост Уитстона в местах расположения резисторов R_1 и R_4 на рис. 4.8, г. Таким образом, влияние большинства мешающих воздействий может быть значительно уменьшено.

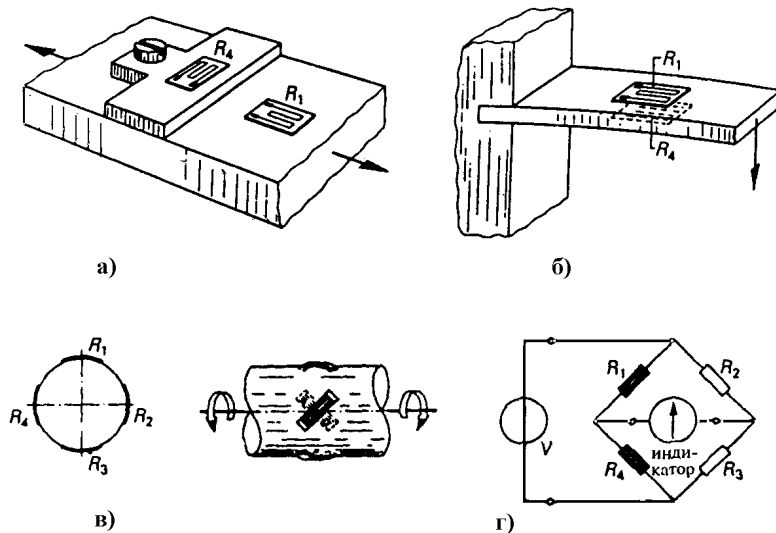


Рис. 4.8. Измерение линейной деформации, изгиба и скручивания с компенсирующими тензодатчиками в мосте Уитстона:

a – компенсация при измерении линейной деформации; *б* – компенсация при измерении изгиба; *в* – измерение крутящего момента; *г* – измерительный мост

Рисунок 4.8, *б* иллюстрирует метод измерения изгиба консольной балки. Рисунок 4.8, *в* показывает способ измерения скручивания вала с помощью четырех тензодатчиков, прикрепленных к валу под углом 45° к оси скручивания. Наконец, рис. 4.8, *г* изображает схему моста Уитстона для компенсации мешающих воздействий. Если тензодатчики R_1 , R_2 , R_3 и R_4 соединены так, как показано, то измерение линейной деформации (*a*) будет нечувствительно к температуре, измерение изгиба (*б*) – к растяжению и температуре, а измерение скручивания (*в*) – даже к растяжению, изгибу, температуре и температурному градиенту вдоль вала. В случаях (*a*) и (*б*) резисторы моста R_2 и R_3 являются постоянными резисторами, сопротивление которых выбирается из соображений максимальной чувствительности моста.

По конструктивному выполнению тензодатчики разделяют на наклеиваемые и несклеиваемые.

Для измерения усилий наклеиваемые тензодатчики используются совместно с различного рода упругими элементами, основные конструктивные формы которых показаны на рис. 4.9, *a – л* [7].

Здесь R_1 и R_2 – тензодатчики, включаемые в плечи моста (рис. 4.9, *м* и *н*); R_1 – рабочий датчик; R_2 – датчик компенсационный, воспринимающий нулевые напряжения или напряжения противоположного знака; δ – зазор, равный нулю при предельной нагрузке.

Упругие элементы (рис. 4.9, *a – в*) используются для измерения больших усилий.

Для обеспечения равномерного распределения напряжения по сечению требуется, чтобы отношение высоты к поперечному размеру H/D было не менее 6, однако при этом мала механическая устойчивость. Для ее повышения используют центрирующие диафрагмы (рис. 4.9, *з*), наборы элементов (рис. 4.9, *д*) или же идут на снижение точности и выбирают H/D менее 6.

Ненклеиваемые тензодатчики изготавливают в различных конструктивных исполнениях. Чувствительным элементом этих датчиков является проволока из константана или других материалов, намотанная на изоляторы, укрепленные на взаимоперемещающихся деталях. Усилие, требуемое для растяжения пучка из n проволок длиной l на величину Δl , равно

$$F = \frac{\pi d^2}{4} n E \frac{\Delta l}{l}, \quad (4.16)$$

где E – модуль упругости материала.

Обычно используются дифференциальные системы, состоящие из двух пучков проволок, намотанных с предварительным натягом. Преимуществом ненклеиваемых датчиков по сравнению с наклеиваемыми являются отсутствие поперечной тензочувствительности и ничтожно малый гистерезис. Температурная погрешность так же, как и в наклеиваемых датчиках, определяется неравенством коэффициентов линейного расширения проволоки и основания и находится по формуле (1.2).

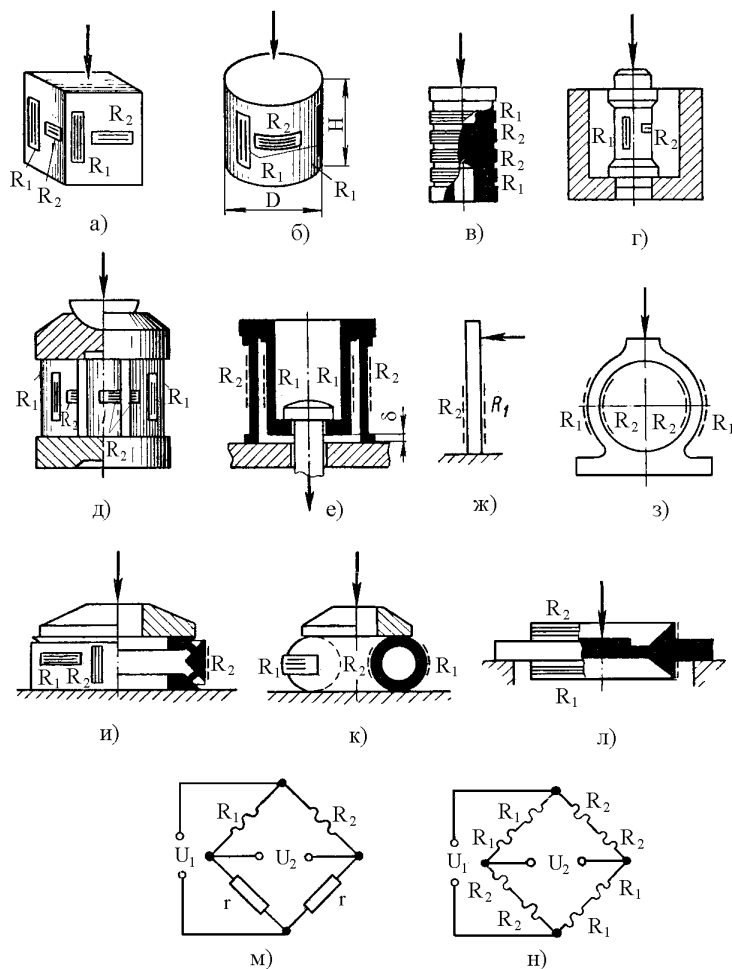


Рис. 4.9. Упругие элементы силоизмерительных устройств:

- a* – призматический; *б* и *в* – цилиндрический;
г – цилиндрический с центрирующей диафрагмой; *д* – комбинированный;
е – элемент в виде двух цилиндров; *ж* – консольная балка; *з* – кольцо;
и – преобразователь осевого усилия в радиальные; *к* – с тороидальной трубкой; *л* – прогибающаяся диафрагма специальной формы; *м* и *н* – схемы включения тензодатчиков, соответственно полумостовая и мостовая

4.2.2. ЕМКОСТНЫЕ ДАТЧИКИ СМЕЩЕНИЯ

Емкость C является функцией расстояния d между электродами датчика, площади электродов A и диэлектрической проницаемости ϵ диэлектрика между электродами [6]:

$$C = C(d, A, \epsilon).$$

Имеются три метода реализации емкостного датчика смещения: можно изменять d , A или ϵ . Эти три метода проиллюстрированы на рис. 4.10. Если выбрать конденсатор с плоскими параллельными пластинами, разнесенными на расстояние x , и пренебречь всеми краевыми эффектами, то емкость такого датчика с параллельными пластинами равна:

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 A}{x}. \quad (4.17)$$

Однако этот датчик не линеен и имеет гиперболическую передаточную характеристику, как показано на рис. 4.10, *a*. Этот тип датчика часто применяют для измерения малых приращений смещения без контакта с измеряемым объектом. Характеристика датчика обычно линеаризуется путем применения балансной схемы.

Если у плоского конденсатора изменяется площадь электродов, то

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 b x}{d}. \quad (4.18)$$

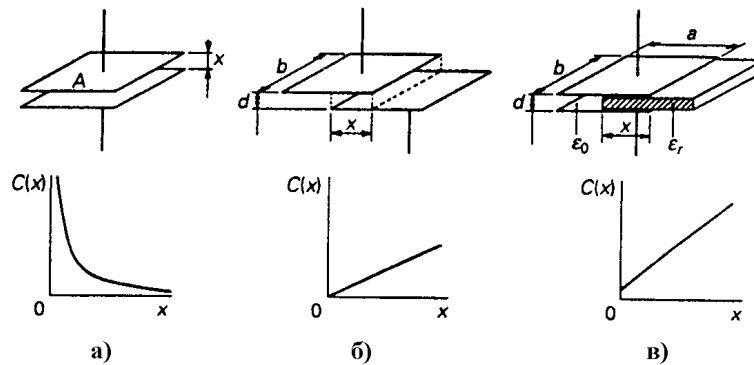


Рис. 4.10. Емкостной датчик смещения:

- a – с изменяемым расстоянием между электродами;
- b – с изменяемой площадью электродов;
- ϵ – с изменяемым диэлектриком

В этом случае датчик имеет линейную зависимость от x . Обычно этот тип датчика реализуется в виде поворотного конденсатора для измерения угловых смещений, а не в виде варианта со сдвигом, приведенного на рис. 4.10, б. Конструкция с поворотным конденсатором применяется также в качестве выходного преобразователя для измерения электрических напряжений (емкостной вольтметр).

4.2.3. ИНДУКТИВНЫЕ ДАТЧИКИ СМЕЩЕНИЯ

Имеется возможность изменять как самоиндукцию одиночной катушки при ее смещении, которое должно быть измерено, так и взаимоиндукцию двух катушек при изменении связи между ними вследствие смещения. Очевидным способом влияния на индуктивность катушки является изменение действующего числа ее витков. Этот принцип схематически изображен на рис. 4.11, а. Другой метод показан на рис. 4.11, б, где индуктивность изменяется путем варьирования магнитного сопротивления сердечника с помощью воздушного зазора переменной ширины [6].

Для обоих датчиков индуктивность определяется следующим выражением:

$$L = \frac{\mu_0 n^2 A}{l_a + l_y / \mu_y}. \quad (4.19)$$

где n – число витков катушки; A – площадь поперечного сечения сердечника; l_a – ширина воздушного зазора; l_y – длина магнитного пути по сердечнику и якорю; μ_y – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала сердечника.

Датчик смещения, в котором используется изменение магнитного сопротивления, включается в мостовую схему с целью получения линейной передаточной характеристики. Использование двух таких датчиков с изменяемым магнитным сопротивлением в мостовой схеме, кроме обеспечения линейности, сводит к нулю силу взаимодействия между сердечником и якорем.

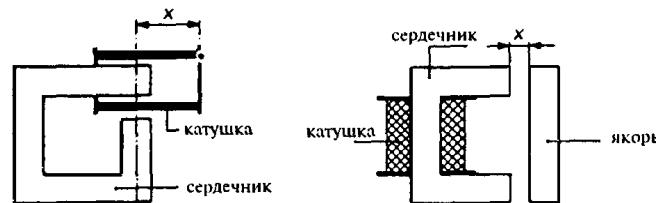


Рис. 4.11. Индуктивные датчики смещения:

- a – основанный на изменении действующего числа витков;
- b – с изменяемым магнитным сопротивлением

Величину индуктивности, являющуюся мерой смещения, можно определить, используя мостовую схему или включив катушку индуктивности в схему генератора.

Индуктивным датчиком, в котором используется изменение взаимной индукции между двумя катушками, является дифференциальный трансформатор. Как следует из названия, этот датчик используется в балансной схеме (см. рис. 4.12). Величина связи между первичной и вторичной обмотками зависит от положения сердечника. Например, если сердечник сдвинут вверх (рис. 4.12, а), то связь между первичной обмоткой и верхней вторичной обмоткой увеличивается и поэтому увеличивается выходное напряжение на этой обмотке. Переменное напряжение верхней вторичной обмотки преобразуется пиковым детектором в постоянное напряжение \hat{V}_1 . На рисунке 4.12, в это напряжение представлено как функция положения x сердечника. На графике хорошо видна сильная нелинейность этой функции. Выпрямленное напряжение нижней вторичной обмотки представлено на том же графике как $-\hat{V}_2$. Сумма этих двух напряжений образует выходное напряжение $V_0 = \hat{V}_1 - \hat{V}_2$. Для малых смещений x центра сердечника относительно положения $x = 0$ выходное напряжение V_0 линейно зависит от x : нелинейность характеристик двух рассмотренных цепей полностью компенсируется. Дифференциальная чувствительность рассмотренного датчика смещения пропорциональна напряжению источника, подключенного к первичной обмотке.

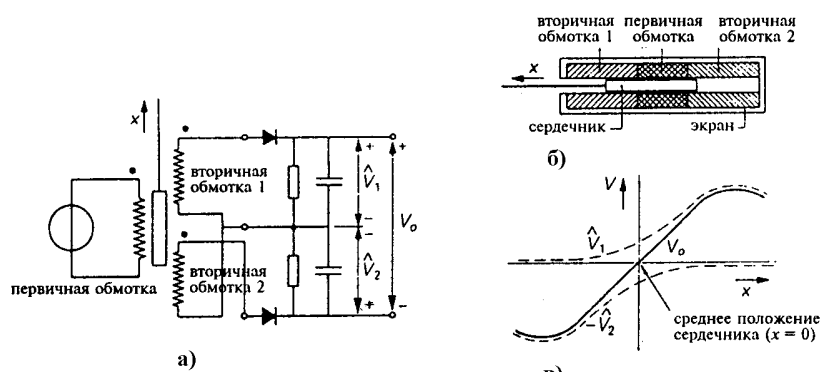


Рис. 4.12. Дифференциальный трансформатор для измерения смещения с двумя пиковыми детекторами:

а – схема; б – поперечный разрез дифференциального трансформатора;
в – передаточная характеристика $V = V(x)$

Существуют дифференциальные трансформаторы для измерения смещения в диапазонах от ± 1 мм до ± 25 см. Нелинейность во всем диапазоне равна приблизительно $2,5 \times 10^{-3}$. Рабочие частоты находятся в пределах от 50 Гц до 10 кГц. Чувствительность дифференциального трансформатора при расположении сердечника в среднем положении и напряжении питания 1 В составляет для диапазона измерения ± 1 мм величину порядка 240 мкВ/мм, а для диапазона ± 25 см – приблизительно 4 мкВ/мм.

Многие отечественные и зарубежные предприятия серийно выпускают индуктивные датчики, так, например, ООО "Промавтоматика" – предприятие, которое специализируется в области приборов КИПиА, выпускает широкий спектр индуктивных датчиков [8].

4.2.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ СИЛЫ

У некоторых материалов наблюдается эффект электрической поляризации, изменяющейся при любой механической деформации материала. Когда к небольшому образцу такого материала приложена сила (или на него оказывается давление), между противоположными гранями образца возникает разность электрических зарядов. Это явление называется пьезоэлектрическим эффектом (от греч. *piezein* – нажать) [6].

Этот эффект наблюдается у материалов, в кристаллической решетке которых отсутствует центр симметрии, например у кварца. Любая внешняя механическая деформация вызывает изменение дипольного момента кристалла. В асимметричном кристалле это изменение различно по разным направлениям, что является причиной макроскопической электрической поляризации, приводящей в результате к возникновению разности зарядов на гранях кристалла. Этот эффект может также наблюдаться в материалах, обладающих центром симметрии, если только симметрия нарушена сильным электрическим полем из-за спонтанной поляризации материала. Примером такого класса материалов (так называемых ферроэлектриков) является титанат бария.

Может также наблюдаться обратный эффект: образец пьезоэлектрического материала деформируется, когда к нему приложено электрическое напряжение.

На рисунке 4.13, а показано, как можно воспользоваться пьезоэлектрическим эффектом в датчике давления. Заряд Q , возникающий на гранях кристалла, пропорционален приложенной силе F , а давление $P =$

AF , где A – площадь поверхности, на которую действует сила F . Чувствительность по заряду S_q пьезоэлектрического датчика силы определяется следующим образом [7]:

$$S_q = \frac{Q}{F}. \quad (4.20)$$

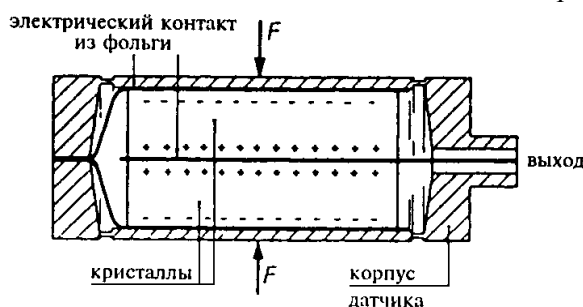


Рис. 4.13. Пьезоэлектрический датчик давления

Эта чувствительность зависит от материала кристалла и его ориентации, но не зависит от размеров кристалла. Чувствительность по напряжению S_V , по определению, равна

$$S_V = \frac{V}{F}$$

и, поскольку для конденсатора справедливо равенство $Q = CV$, находим

$$S_q = CS_V, \quad (4.21)$$

где C – электрическая емкость датчика. Очевидно, что чувствительность пьезоэлектрического датчика по напряжению зависит от его размеров.

Некоторые типичные характеристики реального пьезоэлектрического датчика давления таковы: материал – кварц; диапазон измерения $0 \dots 5000 \text{ Н/см}^2$; нелинейность 1%; чувствительность по заряду $3 \text{ пКл} \cdot \text{см}^2/\text{Н}$; температурный коэффициент чувствительности 10^{-3} К^{-1} ; емкость 8 пФ; резонансная частота 20 кГц; сопротивление утечки 10^{12} Ом .

Характеристики пьезоэлемента, значения коэффициентов, связывающих электрические и механические параметры, зависят от типа кристалла, размеров пластины и ориентации ее граней относительно кристаллографических осей (от типа среза).

Основные типы пьезодатчиков следующие [7]:

1. Пьезодатчик, выполненный из пластин, характеризующихся коэффициентами с одинаковыми индексами, т.е. векторы электрического поля и механического напряжения (сжатия или растяжения) совпадают. Преобразователи с такими пластинами приведены на рис. 4.14.
2. Датчик с продольной деформацией пластин (рис. 4.15).
3. Пьезодатчики с биморфными системами, представляющими собой две склеенные и определенным образом ориентированные пластины.

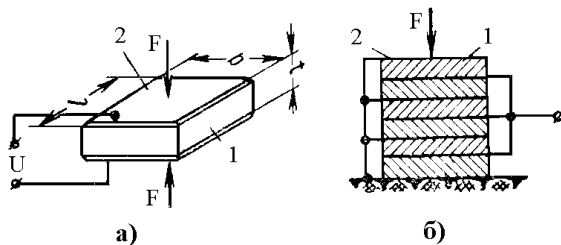


Рис. 4.14. Схемы пьезодатчиков с поперечным сжатием пьезопластин:
1 – кристалл; 2 – обкладка

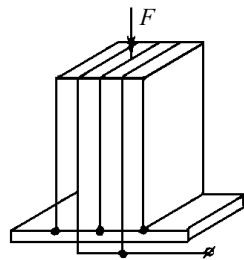


Рис. 4.15.
Пьезодатчик с продольным сжатием пластин

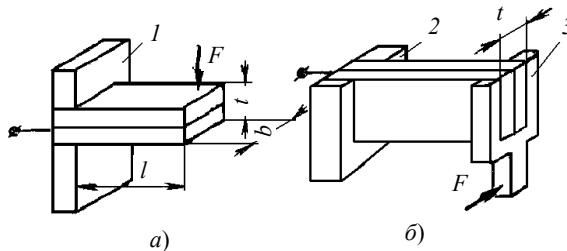


Рис. 4.16. Схемы биморфных пьезодатчиков:
a – с деформацией изгиба; *б* – с деформацией кручения; 1 – пластина; 2 – корпус; 3 – поворотный рычаг

В зависимости от вида среза биморфные системы реагируют на изгиб или на кручение (рис. 4.16).

Пьезоэлектрические элементы широко применяются как генераторы и приемники звуковых колебаний. Для этой цели используются, как правило, одиночные пластины, возбуждаемые по толщине.

На рисунке 4.17 показана схема пьезокварцевого датчика силы типа ДТ(П). Действие датчика основано на преобразовании силы сжатия пьезокристалла в изменение электрических зарядов на его гранях. Кварцевые пьезокристаллы 1 помещены в упругом стальном корпусе 2.

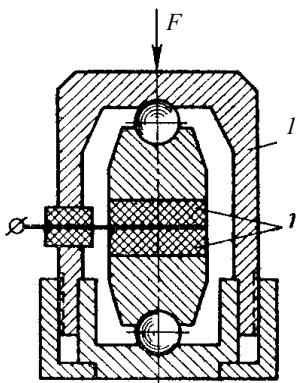


Рис. 4.17. Схема пьезоэлектрического датчика типа ДТ(П)

Датчик работает совместно с усилителями типов ПИ-5Б или УПИТ.

Технические данные

Диапазон изменения сил, кГ	0...20 000
Нелинейность статической характеристики, %	1...3
Допустимая рабочая температура, °С	100
Частота собственных колебаний, кГц	до 30
Частотный диапазон, Гц	0,1...2500
Габаритные размеры, мм	0,80 × 120

Датчик предназначен для измерения сил между элементами конструкций или силы тяги авиадвигателей.

4.2.5. ДАТЧИКИ С ЧАСТОТНЫМ ВЫХОДОМ

Механические колебательные системы, как правило, обладают очень высокой добротностью ($Q = 10^3 \dots 10^4$), что позволяет получить высокую точность преобразования. Частота собственных колебаний системы с сосредоточенными параметрами

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}. \quad (4.22)$$

Воздействовать на величину частоты можно, изменяя жесткость K или массу m . Датчики с изменяющейся массой практически не используются. Жесткость характеризуется силой, пропорциональной отклонению массы от нейтрального положения и направленной в сторону, противоположную отклонению. Эта сила может быть создана упругими элементами, на которых закреплена масса, или же приложена к массе извне, как, например, в маятнике, где жесткость создается за счет силы тяжести. Для изменения жесткости в первом случае требуется изме-

нить размеры, форму или свойства упругих элементов, во втором случае – величину внешних сил. На практике используются оба метода. На рисунке 4.18 приведены структурные схемы возбуждения колебаний в датчиках с механической колебательной системой. Схемы, показанные на рис. 4.18, *a* и *б*, предназначены для работы в режиме запрос – ответ. Первая схема содержит два преобразователя: преобразователь Π_1 для сигнала запроса $F = F(I_1)$ и выходной преобразователь Π_2 . $V = V(v)$, где F – сила, прикладываемая к массе; v – скорость движения тела при колебаниях; V – выходная ЭДС. Вторая схема содержит один обратимый преобразователь, выполняющий обе функции. Схемы, приведенные на рис. 4.18, *в* и *г*, обеспечивают непрерывную генерацию колебаний.

Широкое распространение в промышленности, особенно в последние годы, получили струнные датчики силы и перемещений. Собственная частота колебаний натянутой струны определяется выражением

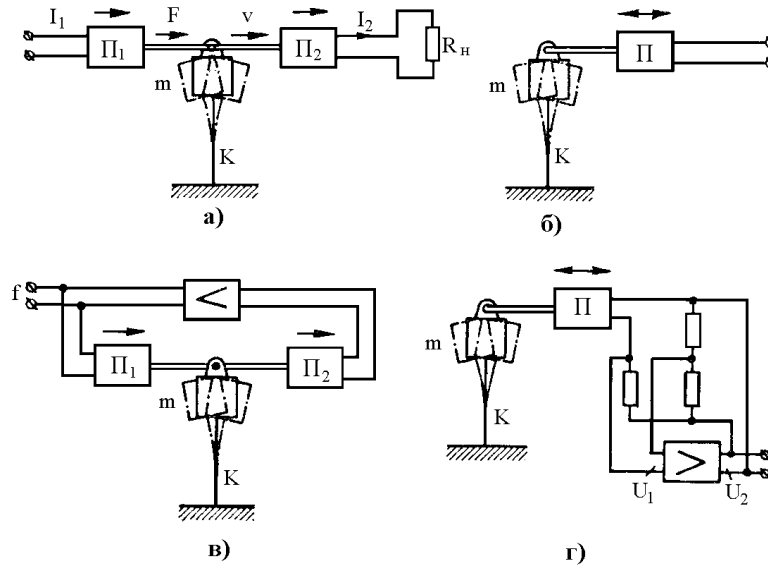


Рис. 4.18. Схемы электромеханических датчиков с колебательными системами:
а и б – схемы датчиков, выдающих сигнал по запросу; *в и г* – датчики-генераторы

$$f = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho l}} = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{F}{\rho s}}, \quad (4.23)$$

где l – длина струны, м; F – сила натяжения, Н; ρ_1 – линейная плотность струны, кг/м; ρ_2 – объемная плотность материала струны, кг/м³; n – номер гармоники (обычно $n = 1$); s – сечение струны.

Формула выведена из предположения, что жесткость создается только за счет внешней растягивающей силы. Это имеет место при $l/d \geq 300$. Изменение частоты колебаний струны может быть осуществлено за счет изменения ее длины l или, что более удобно, изменением силы ее натяга F . Таким образом, растягиваемый отрезок струны, снабженный электромеханическим преобразователем, представляет собой датчик усилий с частотным выходом. Удлинение струны при растяжении равно

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}, \quad (4.24)$$

где E – модуль упругости, н/м².

Это соотношение позволяет использовать струнный датчик для контроля малых перемещений в пределах величины Δl . Струна делается круглого или плоского сечения.

При малых натяжениях ($\sigma = f/S = 15 \dots 20$ кг/мм²) колебания струны становятся неустойчивыми.

Энергия, затрачиваемая на изменение длины струны:

$$W = \frac{F\Delta l}{2} = \frac{F^2 l}{2ES}. \quad (4.25)$$

Частота колебаний струны в зависимости от приложенной энергии определяется по формуле

$$f = \frac{1}{l} \sqrt[4]{\frac{EW}{8\rho^2 S l}}. \quad (4.26)$$

В зависимости от материала струны выбирают тот или иной метод возбуждения колебаний. Для немагнитных струн, например, используют магнитоэлектрический метод (рис. 4.19, *а и б*), при котором ток возбуждения подается в струну, расположенную между полюсами постоянного магнита. Выходная ЭДС снимается с той же струны. При необходимости получения незатухающих колебаний датчик включают в схему (рис. 4.18, *з*).

Для магнитных струн применяют электромагнитный метод возбуждения колебаний (рис. 4.20). Непрерывные колебания получают по схеме, представленной на рис. 4.18, *в*.

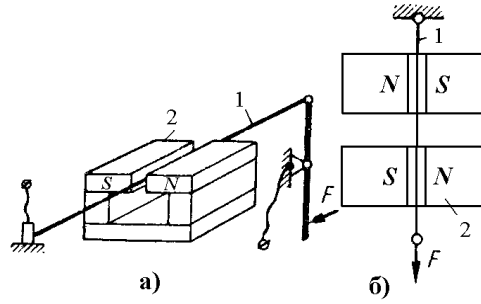


Рис. 4.19. Способы возбуждения колебаний немагнитных струн:
a – на первой гармонике; *б* – на второй гармонике;
1 – струна; *2* – полюса постоянного магнита

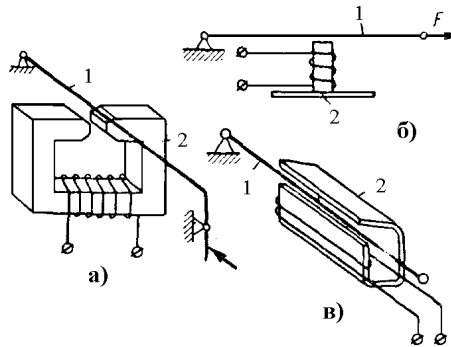


Рис. 4.20. Способы возбуждения колебаний стальных струн:
a – со струей, втягивающейся в зазор; *б, в* – со струной, притягивающейся к полюсу электромагнита; *1* – струна;
2 – магнитная система

Разработаны различные способы закрепления концов струны. Точность струнного датчика существенно зависит от режима его работы: при измерении усилий, когда жесткость струны значительно выше приведенной жесткости присоединенной к ней системы, погрешности минимальны. Так, температурная зависимость частоты колебаний численно равна температурному коэффициенту удлинения, т.е. $(4...18) \cdot 10^{-4} \% / ^\circ\text{C}$. Все другие причины изменения длины струны (вытягивание из зажимов, ползучесть материала, упругое последствие) вызывают погрешность $\frac{\Delta f}{f}$, равную $-\frac{\Delta l}{l}$.

При измерении малых перемещений струна заделывается в жесткую конструкцию, а температурная погрешность определяется выражением

$$\frac{\Delta f}{f} \cong \frac{(\alpha_{oc} - \alpha_c) l \Delta t}{\Delta l_0}, \quad (4.27)$$

где α_{oc} и α_c – температурные коэффициенты удлинения основания и струны; Δl_0 – максимальное рабочее удлинение струны, вызванное измеряемым усилием.

Так, например, для вольфрамовой струны длиной 50 мм на стальном основании при $\Delta l_0 = 100$ мк температурная погрешность составляет 3,4 % на 10 °С. Все факторы, вызывающие изменение длины струны на Δl , приводят к появлению погрешности, равной $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta l}{\Delta l_0}$, поэтому струнные датчики перемещения должны быть снабжены особо надежными зажимами струны, а последние подвергнуты старению (выдержаны при 200 °С в течение 4 ч).

Существенным недостатком струнных датчиков простейшего исполнения является нелинейность характеристики $f = k\sqrt{F}$. Это создает трудности при изготовлении датчиков с унифицированными выходными сигналами, при проектировании вторичных устройств, рассчитанных на работу со струнными датчиками, усложняет операцию интегрирования величин путем счета числа периодов.

Простым методом повышения точности является создание предварительного натяга струн с помощью высокостабильных пружин. Измеряемая сила, направленная перпендикулярно силе пружины, вызывает перераспределение натяжений струн [9]. Разностная частота

$$f = f_1 - f_2 = \frac{F}{F_0 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} f_0, \quad (4.28)$$

где f_0 – частота при $F = 0$.

Струнный датчик изображен на рис. 4.21. Две струны датчика расположены под достаточно малым углом и натянуты пружиной. Входной величиной является перемещение x конца одной из струн, приводящее к перераспределению сил натяжения струн, уравнивающих действие пружины.

Преимуществом этой конструкции является практически полная независимость характеристики от температуры при измерении малых перемещений, а также простота съема сигнала (достаточно только одной магнитной системы).

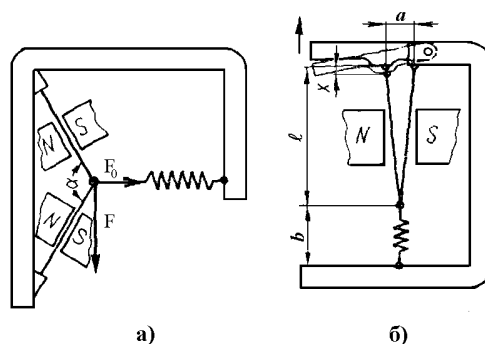


Рис. 4.21. Дифференциальные датчики с пружинным натягом струн

Разработан дифференциальный струнный датчик, в котором частота колебаний струн изменяется за счет изменения поперечной жесткости струн [10]. В качестве последних использованы две скрученные вдоль продольной оси ленточки. Частота их колебаний зависит от угла закручивания. При использовании дифференциальной схемы разностная частота двух скрученных струн, одна из которых дополнительно закручивается, другая – раскручивается, изменяется по закону, близкому к линейному.

Примером датчика, в котором входное перемещение изменяет конфигурацию колеблющейся системы, а следовательно, ее жесткость, является пластинчатый датчик перемещений, разработанный в Институте автоматики и телемеханики [11].

Схема такого датчика приведена на рис. 4.22. Колеблющимся элементом является ферромагнитный якорь, укрепленный на консоли, составленной из двух плоских пружин. Входное перемещение изменяет расстояние между точками закрепления пружин и этим меняет их жесткость. Электромагнитный преобразователь позволяет возбуждать колебания системы и снимать выходной сигнал (см. схемы на рис. 4.18).

Приближенный расчет дает следующее соотношение между частотой f и расстоянием x между пластинами в месте их закрепления:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Eb\rho}{2M_{np}L^3} \left[1 + \left(\frac{x+\delta}{\delta} \right)^2 \right]}, \quad (4.29)$$

где E – модуль упругости, н/м²; M_{np} – приведенная масса, кг; δ , b и L – размеры пластины, м.

На рисунке 4.23 показан частотный датчик силы, разработанный НИКИМП [7].

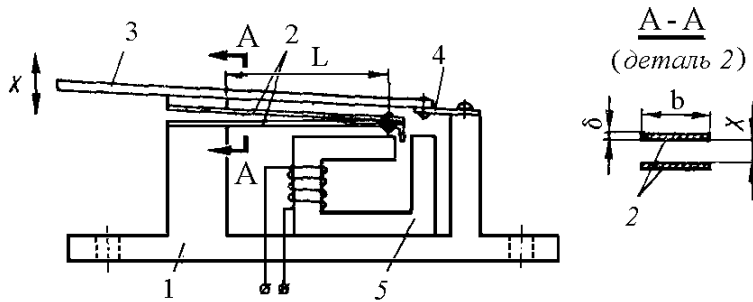


Рис. 4.22. Пластинчатый датчик перемещений:
 1 – основание; 2 – упругие пластины; 3 – рычаг; 4 – пружина (ось вращения);
 5 – электромеханический преобразователь

Колеблющимся элементом датчика является перемычка, составляющая одно целое с упругим стальным кольцом. При сжатии кольца пластина, расположенная по его диаметру, растягивается; это меняет частоту ее колебаний f_1 . Для возбуждения применяют два электромагнитных преобразователя и усилитель (см. рис. 4.18, в). Упругость перемычки (рис. 4.23) создается за счет поперечной жесткости и продольного растяжения. Оба эти фактора в данной конструкции определяются модулем упругости материала и поэтому зависят от температуры (температурный коэффициент a_E). Для компенсации температурного влияния применяют дополнительную консольную пластину, которую включают в схему самостоятельного генератора. Во вторичном приборе предусматривается логометрический преобразователь, выдающий отношение f_1/f_2 . Частота f_1 определяется соотношением

$$f_1 = \frac{1}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{g(504EJ_2 - 12Nl^2)}{\gamma bh}}, \quad (4.30)$$

где l – длина перемычки; J_2 – момент инерции перемычки ($J_2 = \frac{bh^3}{12}$); b – ширина перемычки; h – толщина перемычки; γ – удельный вес материала; N – усилие растяжения перемычки;

$$N = \frac{0,137FR^3}{J_1 \left(0,149 \frac{R^3}{J_1} + \frac{l}{s} \right)}, \quad (4.31)$$

где R – средний радиус кольца; F – сила нагружения; J_1 – момент инерции сечения кольца; s – площадь поперечного сечения перемычки.

Стабильность характеристики датчика достаточно высокая, что объясняется отсутствием разъемных соединений; сварки или клепки в деталях основной конструкции. Точность выполненных образцов составляет 0,1 %.

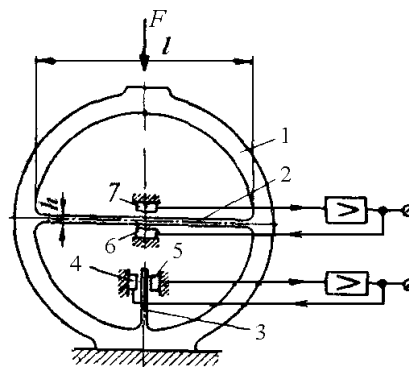


Рис. 4.24. Принципиальная схема датчика ДВ-5

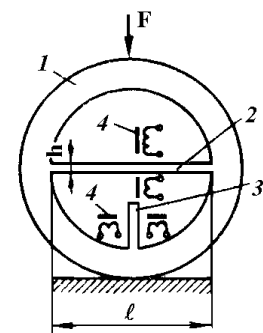


Рис. 4.23. Частотный датчик усилий:
 1 – упругое кольцо; 2 и 3 – вибрирующие пластины (рабочая и компенсационная);
 4 – электромеханические преобразователи

Известны датчики силы, в которых колебательной системой является кварцевая пластина, включенная в схему генератора. При приложении силы в 3,2 кг кварцевая пластина размером $0,278 \times 12,7 \times 12,7$ мм меняет свою частоту на 2 кГц при начальной частоте 6,3 МГц. Схема частотного датчика силы (вибрационный динамометр) ДВ-5 показана на рис. 4.24. Действие датчика основано на преобразовании силы F , приложенной к упругому кольцу 1, в изменение собственной частоты поперечных колебаний перемычки 2. Упругое кольцо 1 и перемычка 2 выполнены за одно целое. Для возбуждения и съема колебаний служит система, состоящая из двух электромагнитов 6 и 7, включенных на вход и на выход усилителя. Стержень 3 служит для температурной компенсации и имеет аналогичную систему возбуждения и съема сигнала (электромагниты 5 и 4).

4.2.6. ОПТИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ СМЕЩЕНИЯ

Смещение можно обнаружить также оптически с помощью кодирующей ленты (при поступательном движении) или поворотного кодера (при вращении). На рисунке 4.25, *а* показан оптический датчик смещения, в котором применена кодирующая лента, на которой в несколько рядов чередуются прозрачные и непрозрачные участки [7]. Положение ленты преобразуется непосредственно в цифровой сигнал узким лучом света и рядом световых датчиков. Цифровой код определяется расположением прозрачных и непрозрачных полос на ленте.

Необходимо отметить, что обычно код, используемый в оптическом преобразователе – не простой двоичный код, как показано на рис. 4.25, *а*. Основной недостаток простого двоичного кода состоит в том, что даже при совсем небольшом смещении могут измениться сразу несколько битов. Из-за конечной разрешающей способности системы оптического обнаружения может возникнуть ситуация, при которой только часть (но еще не все) биты изменились. Это (переходное) состояние может соответствовать совершенно другому положению кодирующей ленты. Поэтому обычно выбирается код, в котором одновременно изменяется не более одного бита, например, код Грея.

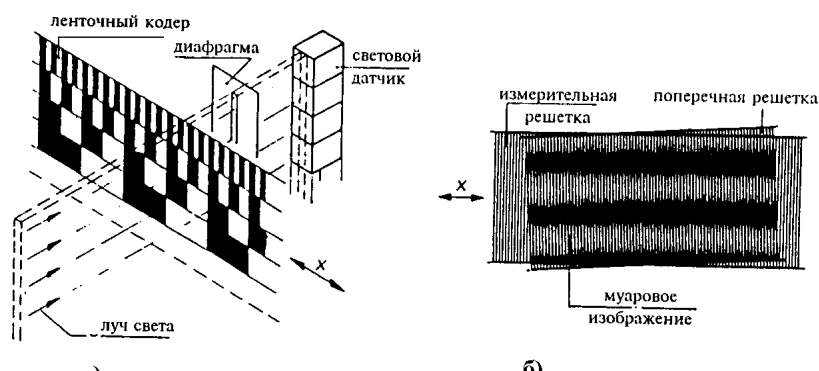


Рис. 4.25. Оптический датчик смещения с кодирующей лентой:
а – схема датчика; *б* – использование муарового изображения

Датчики смещения, в которых применяются поворотный или ленточный кодеры, имеют фиксированное положение нуля, поэтому они относятся к абсолютным датчикам смещения. Особенно удобны эти датчики для цифрового управления перемещением при подключении к компьютеру.

В качестве альтернативы методу кодирования абсолютного положения по отношению к ленте можно использовать также единственную дорожку чередующихся прозрачных и непрозрачных полос. Тогда изменение положения можно определить, подсчитывая число импульсов света. Этот метод не имеет фиксированного положения нуля и поэтому измеряет приращение смещения. В основе измерения лежит измерение интервала. Здесь разрешающая способность определяется наименьшим различимым расстоянием между двумя смежными линиями решетки. Это расстояние ограничено световым датчиком и составляет обычно только 1 мм. Если желательнее более высокое разрешение, можно воспользоваться муаровым изображением, как это показано на рис. 4.25, *б*. Дополнительная решетка помещается перед основной измерительной решеткой под небольшим углом, что создает картину светлых и темных полос, передвигающихся вертикально, когда измерительная решетка перемещается горизонтально. Когда решетка перемещается на расстояние, равное расстоянию между двумя линиями решетки, лучи будут перемещаться на расстояние, точно равное их собственной ширине. Расстояние между лучами и ширина лучей определяются углом между передней решеткой и измерительной решеткой. Когда датчик света помещается позади этой конструкции, создается впечатление, будто расстояние между линиями решетки увеличилось.

При использовании такого метода можно получить увеличение чувствительности к смещению в 10^3 раз. Разрешающая способность составляет величину порядка 1 мкм. При использовании призм и других оптических средств эту величину можно увеличить еще больше.

Следующим шагом (по сравнению с одноэлементными приборами) в увеличении степени интеграции оптоэлектронных приборов являются оптрона, которые сочетают в себе 2 основных элемента оптоэлектроники – излучатель и фотоприемник, разделенные прозрачной диэлектрической средой. Оптрона открывают широкие возможности для схемного проектирования, недостижимые с использованием обычных микроэлектронных средств. В простейшем случае в качестве излучателя может использоваться лампочка накаливания или неоновая лампочка, а в качестве диэлектрической среды – воздух, стекло, пластмасса, волоконно-оптический световод. Однако в силу ряда причин наибольший интерес представляют оптрона с использованием светоизлучающих кристаллов и различных типов фотоприемников.

Анализ выпускаемой крупнейшими зарубежными оптоэлектронными фирмами продукции [12] показывает, что в настоящее время предложен достаточно широкий класс сенсорных устройств, построенных в оптронной геометрии с открытым каналом, для систем экологического контроля, медицины, измерительной техники, торговли и учета продукции.

Другая серия датчиков перемещения и угла поворота разработана фирмой RSF-Electronics (Германия): DG116-DG 182. Эти приборы обеспечивают измерение скорости вращения до 1200 об/мин, при этом точность измерения угла поворота составляет $\pm 360/8 N$, где N – число штрихов на вращающемся диске. Широкий выпуск серии датчиков угла поворота заявлен также фирмой Hewlett Packard: HEDS 5500, HEDS 2500, HEDS 6000, HEDS 7500.

Прецизионные датчики положения и перемещения выпускает фирма National (Matsushita, Япония). В данном случае используется трехлучевая оптическая схема с излучающим диодом ИК-диапазона спектра и двумя позиционно-чувствительными фотоприемниками. Приборы MQ-W3A, MQ-W20A, MQ-70A, MQ-W30A обеспечивают прецизионное измерение расстояний в диапазоне 1...1000 см.

Среди весовых дозаторов непрерывного действия широкое применение получила конструкция, принцип действия которой основан на измерении перемещения пластины грузоприемного рычага при воздействии на нее потока сыпучего материала [13]. Конструктивные достоинства таких устройств очевидны, однако на практике наименьшие пределы производительности таких дозаторов ограничены сотнями килограммов в час. Это обусловлено тем, что при производительности порядка единиц килограммов в час необходим датчик малых линейных перемещений (0...1 мм), иначе конструкция усложняется, что ведет к ее удорожанию и неконкурентоспособности. Основой датчика перемещения является преобразователь перемещения. Большинство конструкций преобразователей перемещения, такие как потенциометрические, емкостные, индуктивные, магнитные предназначены для измерения перемещения от единиц до сотен миллиметров [14]. Применение конструкций на основе этих методов в необходимом диапазоне измерения перемещения ведет к усложнению конструкции и опять-таки к удорожанию изделия, так, например, датчик емкостного типа ДЛП-0,2 (ЗАО НПЦ "Микропроцессорные технологии", г. С.-Петербург) стоит 110 \$, а прецизионный прибор для измерения линейных перемещений на базе лазерного интерферометра производства СКБ "Индикатор" (г. С.-Петербург) стоит 2500 \$.

Для решения этой задачи нами было предложено устройство, основой которого является оптический измерительный преобразователь, где в качестве фотопроводящего переходного датчика применяется PIN-фотодиод из монокристаллического кремния [15]. Базовая структурная схема прибора [16] приведена на рис. 4.26.

Такая схема практически реализуема на базе современных микроконтроллеров или компьютерных систем. Например, компания National Instruments является мировым лидером в производстве компьютерных систем сбора данных и предлагает семейство модульных систем согласования практически любого типа сигналов. Системы согласования сигналов National Instruments обеспечивают подключение различных датчиков и позволяют на порядки увеличить точность проводимых измерений, однако стоимость самых простых таких устройств (измерителей и регистраторов) не менее 300 \$, а для проведения экспериментов потребуются более сложные (так как потребуются вычисления в реальном масштабе времени) и, следовательно, более дорогие. Но основной проблемой данной конструкции будет ее высокая температурная зависимость, так как пик чувствительности PIN-фотодиода находится в инфракрасной области спектра, что приводит к проблеме физической реализации данного датчика вследствие возникающей высокой температурной погрешности измерения.



Рис. 4.26. Базовая структурная схема цифрового прибора:

ИЗ – аналоговый сигнал измеренного значения;

ИП – измерительный преобразователь;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь; УИ – устройство индикации



Рис. 4.27. Экспериментальная установка для непрерывного весового дозирования зернистых материалов

Анализ существующих методов решения задачи компенсации температурной погрешности измерительных систем на базе фотодиодов привел к созданию оптического датчика малых линейных перемещений [17], на базе которого были созданы датчик веса [18], датчик расхода [19], а также устройство сопряжения данных датчиков с ПЭВМ типа IBM PC и необходимое для него программное обеспечение. На базе датчика расхода была создана экспериментальная установка для исследования непрерывного весового дозирования зернистых материалов (рис. 4.27).

Уравнением связи для данного устройства является уравнение плоскости

$$P = aT + bU + D, \quad (4.32)$$

где P – расход зернистого материала; T – температура окружающей среды; U – напряжение на выходе оптического датчика расхода; a, b, D – константы, определяемые для каждого датчика

Для нахождения констант создана программа, в качестве данных для которой используются данные, полученные на экспериментальной установке. В качестве расходимого материала использовался мелкозернистый песок. На рисунке 4.28 показан график выходного напряжения октрона (октрона) в течение времени при двух режимах расхода и температуре окружающей среды 297 К.

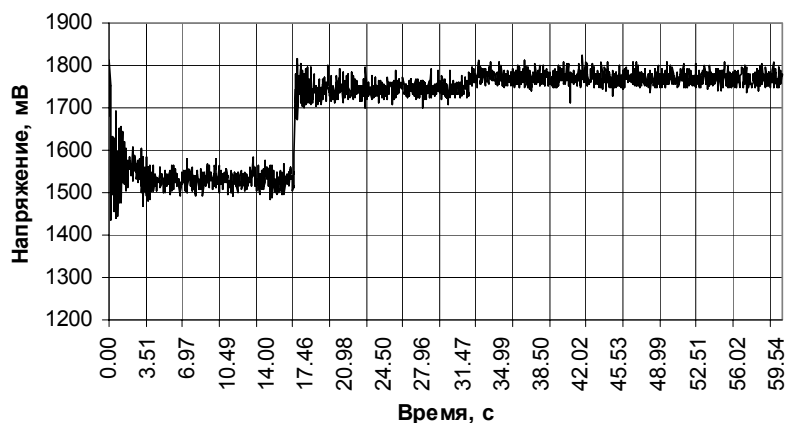


Рис. 4.28. График выходного напряжения октрона при температуре окружающей среды 297 К

На этом графике период времени от 0 до 16,53 с соответствует расходу 0,7 г/с, период от 16,53 до 32,02 с – расходу 0,16 г/с, в период от 32,02 до 60 с расход отсутствует. Следует отметить, что хорошо видны затухающие колебания грузоприемной пластины датчика расхода в начале и конце отмеченных периодов. Кроме того, у датчика оказались, как это и ожидалось, сильно выраженные шумовые характеристики.

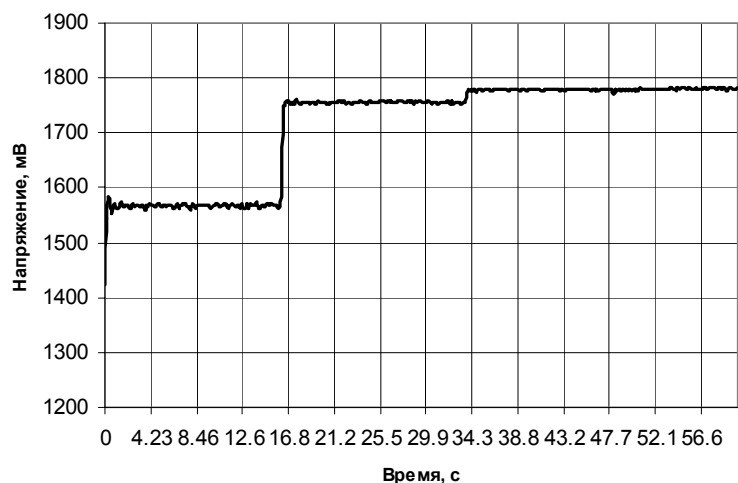


Рис. 4.29. График выходного напряжения октрона при температуре окружающей среды 294 К и постоянной фильтра 64

Однако применение ПЭВМ позволяет устранить этот недостаток численными методами, в данном случае был применен фильтр скользящего среднего в реальном масштабе времени [20]. Результаты экспериментов показаны на рис. 4.29 и 4.30 (на рис. 4.30 участок I соответствует наибольшему расходу).

Лабораторные исследования данного устройства привели к его дальнейшему развитию с целью улучшения его технических и технологических характеристик. Решение подобной задачи приводится в [21], однако применяемые методы решения и свойства первичного измерительного преобразователя, которые лежат в основе каждого метода, различны.

Используя способ параллельной компенсации в измерительной системе [6], получаем измерительное устройство, структурная схема которого показана на рис. 4.31, где 1, 2 – сумматоры; D_0, D_1 – фотодиоды дифференциальной оптопары; X_0 – воздействие излучателя дифференциальной оптопары; X – воздействие измеряемой величины; T – температура окружающей среды; $F(X_0, T), F(X, T)$ – значения выходных сигналов; U – выходной сигнал дифференциального датчика; УИ – устройство индикации.

Сигнал (см. рис. 4.31) источника опорной величины X_0 и измеряемой величины X попадают на сумматор 1, с выхода которого сигнал X_1 поступает на первичный измерительный преобразователь (ПИП) D_1 . Сигнал X_0 поступает на опорный ПИП D_0 . Полученные выходные сигналы $F(X_0, T)$ и $F(X_1, T)$ попадают в сумматор 2, с выхода которого сигнал U поступает на устройство индикации (УИ). Применение численных способов температурной компенсации связано с градуировкой датчика по температурному каналу, с измерением температуры датчика и, следовательно, приводит к дополнительной погрешности измерения.

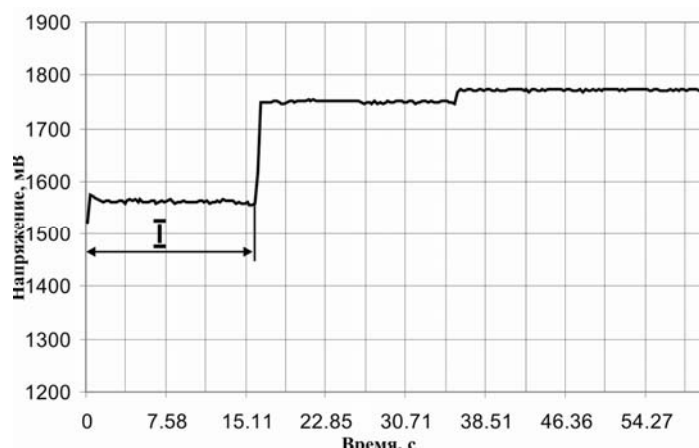


Рис. 4.30. График выходного напряжения октрона при температуре окружающей среды 293,5 К и постоянной фильтра 128

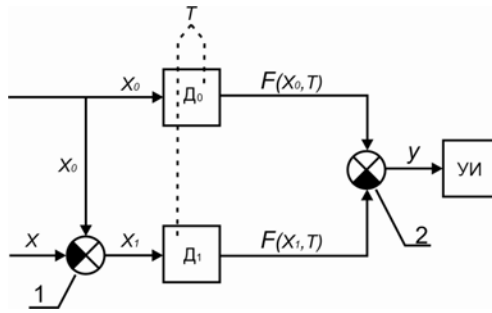


Рис. 4.31. Структурная схема дифференциального датчика с идентичными температурными характеристиками первичных измерительных преобразователей

В случае автоматической температурной компенсации дифференциального датчика имеем:

$$\begin{aligned} X_0 &= \text{const}; \\ X_1 &= X_0 - X; \\ F(X_0, T) &= k_{0X}X_0 + k_{0T}T + C, \end{aligned} \quad (4.33)$$

где $k_{0X} = \text{const}$; $k_{0T} = \text{const}$; $C = \text{const}$.

Следовательно,

$$F(X_0, T) = k_{0T}T + C_0, \quad (4.34)$$

где $C_0 = \text{const}$.

$$F(X_1, T) = k_{1X}X_1 + k_{1T}T + C_1, \quad (4.35)$$

где $k_{1X} = \text{const}$; $k_{1T} = \text{const}$; $C_1 = \text{const}$.

$$y = F(X_0, T) - F(X_1, T). \quad (4.36)$$

Необходимым условием физической реализации автоматической температурной компенсации дифференциального датчика является идентичность характеристик опорного и измерительного датчика, т.е. в этом случае

$$k_{0T} = k_{1T}. \quad (4.37)$$

Таким образом, при подстановке (4.34) и (4.35) в (4.36) с учетом (4.37) получаем:

$$y = -k_{1X}X + C', \quad (4.38)$$

т.е. разность сигналов опорного и измерительного датчика прямо пропорциональна измеряемой величине X и не зависит от температуры окружающей среды. Такое техническое решение весьма сложно технологически, а в некоторых случаях невозможно, так как датчики с идентичными свойствами не удается изготовить.

Для решения поставленной задачи предлагается измерительное устройство, структурная схема которого показана на рис. 4.32, где I – сумматор; D_0, D_1 – фотодиоды дифференциальной оптопары; X_0 – воздействие излучателя дифференциальной оптопары; X – воздействие измеряемой величины; T – температура окружающей среды; $F(X_0, T), F(X_1, T)$ – значения выходных сигналов; АК – аналоговый коммутатор; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВУ – вычислительное устройство; УИ – устройство индикации.

Таким образом, в общем случае

$$k_{0T} \neq k_{1T}$$

и в результате преобразований получаем:

$$y = kF(X_0, T) + k_{1X}X + C, \quad (4.39)$$

где $k = \text{const}$; $k_{1X} = \text{const}$; $C = \text{const}$.

При подстановке (4.36) в (4.39) получаем

$$X = \frac{F(X_0, T) (1-k) - F(X_1, T) - C}{k_{1X}} . \quad (4.40)$$

Устройство работает следующим образом. Выходные сигналы $F(X_0, T)$ и $F(X_1, T)$ поступают в аналоговый коммутатор АК, затем каждый из них преобразуется в цифровой сигнал в аналого-цифровом преобразователе АЦП, после чего оба попадают в вычислительное устройство ВУ, где производится вычисление измеряемой величины X по формуле (4.40), где k_{1X} – коэффициент пропорциональности; k и C – постоянные величины для данной оптопары. Результат выводится на устройство индикации УИ.

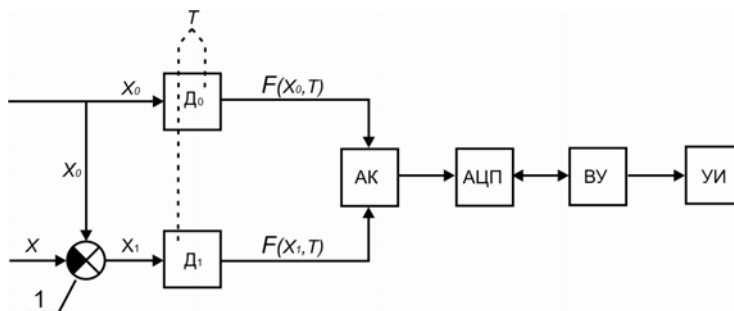


Рис. 4.32. Структурная схема дифференциального датчика с неидентичными температурными характеристиками первичных измерительных преобразователей

Для определения значений величин k и C создана компьютерная программа, для которой в качестве данных используются экспериментальные данные, полученные в статическом режиме при изменяющейся температуре окружающей среды, причем значения температуры при этом не измеряются, k_{1X} определяется при градуировке измерительной системы. Система реализована в виде экспериментальной установки для измерения расхода зернистых материалов, где дифференциальный оптический датчик применен в качестве первичного измерительного преобразователя [22]. Графики расхода зернистых материалов представлены на рис. 4.33 и 4.34.

График на рис. 4.34 отличается от графика на рис. 4.33 тем, что в дозируемый поток в промежуток времени Δt был внесен дополнительный расход $\Delta P = 0,16$ г/с и применен в реальном масштабе времени фильтр скользящего среднего с постоянной 256. Как видно из графика, даже небольшое, около 10 % от текущего расхода, что по ГОСТ 30124–99 соответствует наименьшему пределу производительности дозатора, изменение расхода сыпучего материала четко фиксируется датчиком.

Следует особо отметить, что использование фильтра скользящего среднего в реальном масштабе времени позволяет применить данный метод с достаточной точностью для различных сыпучих материалов. Это подтверждается тем, что при метрологической поверке устройства, проводившейся по ГОСТ 8.469–2002, наилучшие результаты предельной приведенной погрешности не превысили 0,6 %.

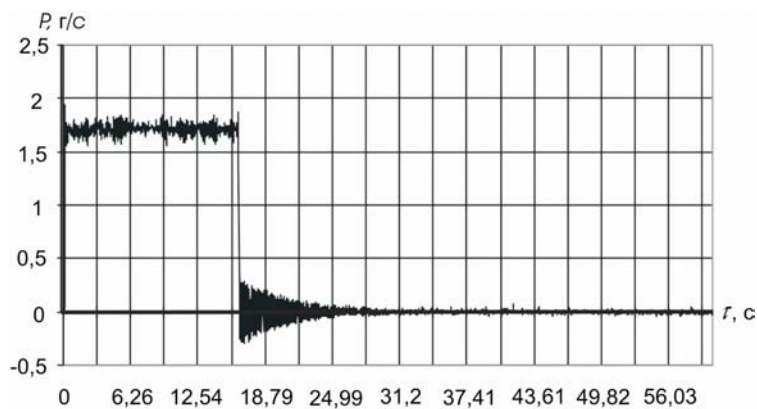


Рис. 4.33. График расхода без применения фильтра скользящего среднего

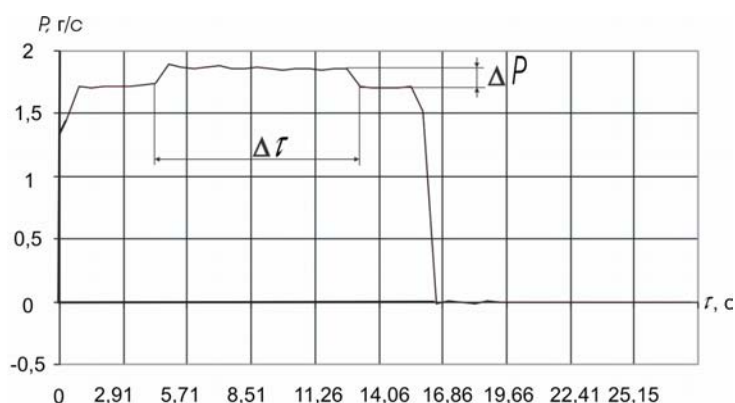


Рис. 4.34. График расхода при постоянной фильтра скользящего среднего 256

Кроме этого, применяя данный метод, удалось не только повысить точность измерения за счет уменьшения погрешности (так как не измеряется температура окружающей среды и, следовательно, не вносится дополнительная погрешность на ее измерение), но и повысить информативное восприятие графиков расхода (сравнить, например, с графиком на рис. 4.30, где участок I соответствует наибольшему расходу).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование имитационного моделирования при расчетах ленточных весовых дозаторов / А.И. Инякин, А.Ю. Давидчук, Д.В. Филимонов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 27 – 30.
2. Volumetric Feeders Catalog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ktron.com/Products/feeders/catalog/volumetric_feeders.cfm, свободный.
3. VOLUMETRIC FEEDERS – TUF-FLEX™ SERIES FEEDERS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.accuratefeeders.com/volumetricfeeders.html>, свободный.
4. Volumetric Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.acrison.com/pages/volumetric_feeders_overview.html, свободный
5. Volumetric Feeders [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brabender-technologie.com/mainpage/english/products/feeders>, свободный.
6. Клаассен, К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К.Б. Клаассен. – М. : Постмаркет, 2000. – 352 с.
7. Агейкин, Д.И. Датчики контроля и регулирования: Справочные материалы / Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. – М. : Машиностроение, 1965. – 928 с.
8. Индуктивные датчики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://asuworld.ru/about/company/>, свободный.
9. А. с. 153392 СССР, МКИ⁶ G 01 L 1/10, G 01 B 17/04. Способ измерения усилий / Ю.М. Брук, Ю.М. Цодиков, Р.М. Васин (СССР). – № 728941/26 ; заявл.28.04.61 ; опубл. 01.01.63, Бюл. № 5. – 4 с.
10. Вутсас, А.М. Вибрационный датчик угла поворота / А.М. Вутсас // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – № 4. – С. 176–177.
11. А. с. 150040 СССР, МКИ⁶ G 01 B 7/02, H 03 M 1/86. Частотный датчик малых линейных перемещений / Д.И. Агейкин, Н.Н. Кузнецова (СССР). – № 749836/26-10 ; заявл. 1.11.61 ; опубл. 01.01.62, Бюл. № 17. – 3 с.
12. Ермаков, О.Н. Прикладная оптоэлектроника / О.Н. Ермаков. – М. : Техносфера, 2004. – 416 с.
13. Весоизмерительное оборудование : справочник / Н.А. Лотков, А.И. Полухин, А.В. Тантлевский, В.Д. Черных – М. : Агропромиздат, 1989. – 240 с.
14. Бриндли, К. Измерительные преобразователи : справочное пособие / К. Бриндли ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1991 – 144 с.
15. Silicon PIN Photodiode "Vishay Telefunken№: Document Number 81521 Rev.2 20-May-99. <http://vishay.de>.
16. Бриндли, К. Электронные контрольно-измерительные приборы / К. Бриндли ; пер. с англ. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.
17. Егоров, С.А. Разработка схемы весового дозирования зернистых материалов на основе оптического датчика малых линейных перемещений / С.А. Егоров, В.А. Лузгачев, В.Е. Подольский // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Технологические процессы и оборудование. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 8. – С. 89 – 92.
18. Пат. 2257551 Российская Федерация, С2, МКИ 7 G 01 G 3/08. 23/36. 23/48. Датчик веса / В.Ф. Першин, В.Е. Подольский, В.Г. Однолько, С.А. Егоров ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003107349 ; заявл. 17.03.03 ; опубл. 30.08.05, Бюл. № 21.

19. Пат. 2262080 Российская Федерация, С2, МКИ 7 G 01 F 1/30. Датчик расхода / В.Ф. Першин, В.Е. Подольский, В.Г. Однолько, С.А. Егоров; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003110046 ; заявл. 08.04.03 ; опубл. 10.10.05, Бюл. № 27.

20. Дудников, Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности / Е.Г. Дудников [и др.]. – М. : Химия, 1987 – 368 с.

21. Богонин, Б.В. Применение микроЭВМ для минимизации температурной погрешности измерительных систем / Б.В. Богонин, М.Б. Богонин // Датчики и системы. Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2002. – № 12.

22. Пат. 2330243 Российская Федерация, МПК G 01 D 3/028. Способ температурной компенсации дифференциальных датчиков с линейными характеристиками / В.Ф. Першин, С.А. Егоров, В.Е. Подольский ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2006121843/28 ; заявл. 19.06.06 ; опубл. 27.08.08, Бюл. № 21.

5.1. ПРИНЦИП ДВУХСТАДИЙНОГО ДОЗИРОВАНИЯ, ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И ЕЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Во второй главе по результатам анализа способов непрерывного дозирования сыпучих материалов было установлено, что основными причинами возникновения погрешностей при непрерывном дозировании являются динамические воздействия на весоизмерительный датчик, несовершенство методик расчета реальной весовой производительности дозатора по показаниям весоизмерительного датчика и невозможность устранения возникающих погрешностей в реальном времени. Для устранения всех указанных причин нами предложен способ двухстадийного дозирования сыпучих материалов [1, 2]. Сущность данного способа заключается в следующем. На первой стадии весовым методом формируются отдельные порции материала, а на второй осуществляется преобразование отдельных порций в непрерывный поток. Следует особо отметить, что взвешивание отдельных порций осуществляется в статическом положении до начала преобразования этих порций в непрерывный поток. Таким образом, с одной стороны, исключаются погрешности в измерении веса, вызванные динамическим воздействием на чувствительный элемент, а с другой, не возникает погрешностей в определении весовой производительности, которые необходимо впоследствии исправлять. Производительность дозатора рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{\Delta P}{\Delta T}, \quad (5.1)$$

где ΔP – вес отдельной порции; ΔT – интервал времени, через который подают отдельные порции в устройство для их преобразования в непрерывный поток.

Устройство для реализации данного способа состоит из двух основных элементов: порционного весового дозатора; преобразователя отдельных порций в непрерывный поток [3].

На рисунке 5.1 показана функциональная схема дозатора, реализующего технологию двухстадийного дозирования. Рассмотрим более подробно основные элементы схемы.

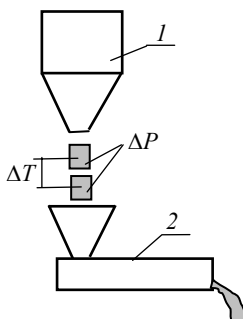


Рис. 5.1. Схема дозатора для реализации технологии двухстадийного дозирования:

1 – порционный дозатор; 2 – преобразователь порций в непрерывный поток

5.1.1. ПОРЦИОННЫЙ ДОЗАТОР

Порционные дозаторы серийно выпускаются многими компаниями как у нас, так и за рубежом. Например, весовой автоматический дозатор ДВА-1 [4] предназначен для автоматического формирования дозы заданной массы сыпучих материалов.

Щадящая нетравмирующая подача с помощью вибрототка позволяет использовать дозатор ДВА-1 для широчайшего спектра продуктов. Дозатор имеет три модификации: ДВА-1, ДВА-1/2 и ДВА-1/3, которые отличаются количеством каналов дозирования, работающих параллельно – 1, 2 или 3 соответственно. Пределы дозирования от 50 до 1000 г с дискретностью задания массы дозы 1 г. Дозаторы обеспечивают производительность, в зависимости от модификации, от 10 до 33 доз в минуту. Класс точности 1 по ГОСТ 10223–97.



Рис. 5.2. Дозатор ДВА-1

Исходный продукт засыпается в бункер дозатора вручную или с помощью загрузочного элеватора. Принцип действия дозатора состоит в контролируемом наборе заданной дозы в грузоприемном устройстве. В начале цикла дозирования виброток дозатора начинает работу и продукт подается в грузоприемный ковш. При достижении заданной массы дозы подача продукта прекращается. По команде разгрузки днище ковша открывается и происходит выгрузка сформированной дозы. Адаптивный алгоритм дозирования позволяет поддерживать постоянство массы дозы при изменяющихся условиях работы (напряжение питания, температура, сыпучесть и плотность дозируемого продукта и т.п.). Установка требуемой дозы, производительности и изменение других параметров дозирования осуществляются с пульта управления, на котором отображаются текущие значения параметров работы (масса дозы, суммарная масса доз). Логика работы двух- и трехканальных модификаций дозатора предусматривает, что по команде разгрузки произойдет открытие того ковша, в котором доза была сформирована раньше. Дозатор может применяться автономно или в комплекте с упаковочным оборудованием, в составе различных технологических линий пищевых и химических производств.

Компания "Brabender-technologie" использует при порционном дозировании технологию "Gain-in-weight". На рисунке 5.3 показан порционный весовой дозатор MicroBatch MB2 [5]. Компания выпускает три модификации: MicroBatch MB2; MicroBatch MB10; MicroBatch MB50. Максимальный вес дозы соответственно равен: 4; 7,5; 50 кг.

Для порционного дозирования плохосыпучих материалов могут быть использованы дозаторы со шнеком, например весовой автоматический дозатор ДВП-3 (рис. 5.4) [6]. Вес одной дозы от 2 до 3 кг. Максимальная производительность дозатора 1500 кг/ч. Дозатор предназначен для автоматического формирования дозы заданной массы продуктов типа: мука, крахмал, стиральный порошок, строительные смеси и т.п. Шнековая подача материала в грузоприемный ковш, а также специальный ворошитель дозируемого материала в наддозаторном бункере делают дозатор ДВП-3 идеальным решением для дозирования муки. Класс точности 1 по ГОСТ 10223–97.

Принцип действия дозатора состоит в контролируемом наборе заданной дозы в грузоприемном устройстве. По началу цикла дозирования шнек питателя дозатора начинает работу и продукт подается в грузоприемный ковш. При достижении заданной массы дозы подача продукта прекращается. По команде разгрузки днище ковша открывается и происходит выгрузка сформированной дозы. При более высокой насыпной массе продукта диапазон формируемых доз может быть расширен до 6 кг. Адаптивный алгоритм дозирования позволяет поддерживать постоянство массы дозы при изменяющихся условиях работы (напряжение питания, температура, сыпучесть и плотность дозируемого продукта и т.п.).



Рис. 5.3. Дозатор MicroBatch MB2



Рис. 5.4. Порционный дозатор ДВП-3

Установка требуемой дозы, производительности и изменение других параметров дозирования осуществляется с пульта управления, на котором отображаются текущие значения параметров работы (масса дозы, суммарная масса доз). Одновременно с дозированием ведется автоматический учет количества доз и суммарной массы отдозированного продукта. Дозатор может применяться автономно или в составе различных технологических линий пищевых и химических производств.

5.1.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ОТДЕЛЬНЫХ ПОРЦИЙ В НЕПРЕРЫВНЫЙ ПОТОК

Учитывая функциональное назначение преобразователя отдельных порций в непрерывный поток, данное устройство должно обладать хорошей сглаживающей способностью. Это означает, что дискретный сигнал на входе в устройство должен быть преобразован в непрерывный сигнал на выходе и амплитуда флюктуаций на выходе должна быть значительно меньше, чем на входе. Первый вариант преобразования отдельных порций в непрерывный поток был реализован в гладкой вращающейся трубе [7, 8], поскольку известно, что вращающаяся труба обладает хорошей сглаживающей способностью [9, 10].

В дальнейшем, для преобразования отдельных порций в непрерывный поток мы использовали наклонный вибрирующий лоток [11] и двухшнековый питатель [12].

Несмотря на существенные различия в конструкциях преобразователей, алгоритмы их исследования и расчета во многом схожи. Так, например, связующим звеном между первой (формирование отдельных порций) и второй (преобразование отдельных порций в непрерывный поток) стадией процесса является загрузка отдельных порций в преобразователь. Загрузку можно характеризовать интервалом времени между подачей отдельных порций (ΔT) и интенсивностью подачи отдельной порции, т.е. интервалом времени (ΔT_L), за которое отдельная порция загружается в преобразователь. Как показывают результаты экспериментальных исследований, после загрузки отдельной порции, например во вращающуюся трубу, порция сыпучего материала постепенно распределяется по ее длине и частицы целенаправленно перемещаются от загрузочного края трубы к разгрузочному краю. Для определения производительности и прогнозирования точности непрерывного дозирования необходимо иметь математическое описание процессов распределения порции (изменение ее формы) и осевого движения частиц. До настоящего времени исследовалось осевое движение частиц во вращающейся трубе либо при установившемся режиме (когда площади, занимаемые зернистым материалом в поперечных сечениях трубы, не изменяются во времени) [10, 13 – 15], либо когда идет распределение одной порции по длине горизонтальной трубы, закрытой по торцам [16]. В нашем случае процесс движения является неустановившимся, поскольку отдельные порции подаются в трубу периодически. Более того, на режим движения оказывает существенное влияние способ выгрузки материала из трубы (подпорные кольца, перфорации в обечайке и т.д.), а также сегрегация полидисперсного материала (скорость образования ядра сегрегации, способы и устройства разрушения этого ядра и т.д.).

Аналогичные проблемы возникают при использовании в качестве преобразователя вибрирующего лотка или двухшнекового питателя. Учитывая вышесказанное, рассмотрим более подробно каждый из вариантов устройства для преобразования отдельных порций в непрерывный поток.

5.2. ТРУБЧАТЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Как отмечалось ранее, машины барабанного типа, основным рабочим органом которых является вращающаяся труба, обладают хорошей сглаживающей способностью, т.е. существенно сглаживают флуктуации входного потока. Учитывая это, в качестве устройства для преобразования отдельных порций материала в непрерывный поток можно использовать гладкую вращающуюся трубу, ось вращения которой горизонтальна или наклонена к горизонту под небольшим углом. Трубчатые питатели объемного принципа действия достаточно широко и успешно используются в производстве [10].

Прежде, чем моделировать процесс преобразования отдельных порций в непрерывный поток, необходимо рассмотреть движение сыпучего материала в поперечном сечении вращающейся трубы и вдоль ее оси.

5.2.1. ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБЫ

В настоящее время можно выделить три основных подхода к описанию движения зернистого материала: модель жидкости с особыми свойствами; модель среды, внутреннее трение в которой подчиняется закону Кулона; так называемый "одночастичный подход", согласно которому движение сыпучего материала рассматривается как осредненное движение отдельных частиц.

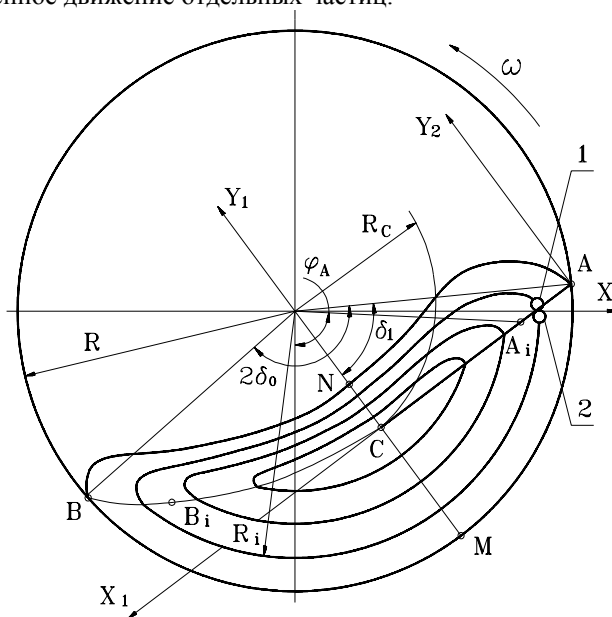


Рис. 5.5. Движение сыпучего материала в поперечном сечении вращающейся трубы

В поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра материал можно разделить на два слоя: поднимающийся (зона $ACBM$, рис. 5.5) и скатывающийся (зона $ACBN$). Осевое движение частиц происходит только во время их пребывания в скатывающемся слое, поэтому для расчета трубчатого преобразователя отдельных порций в непрерывный поток необходимо знать границу раздела слоев.

В работе [17] описан энергетический подход к описанию движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана. В основу подхода положена гипотеза о постоянстве потенциальной энергии, которая сформулирована в следующем виде. При установившемся движении в поле гравитационных сил система достигает такого положения, при котором ее потенциальная энергия равна возможному минимуму, причем достижение указанного состояния происходит путем уменьшения массы системы за счет перехода части частиц за границу системы.

Применительно к описанию движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра под системой понимается совокупность частиц, неподвижных относительно обечайки цилиндра. В поднимающемся слое частицы движутся по концентрическим окружностям с центром на оси вращения и с угловой скоростью, равной скорости вращения цилиндра. Таким образом, частицы, находящиеся в поднимающемся слое, неподвижны относительно цилиндра, поэтому поднимающийся слой часто называют неподвижным слоем. В неподвижном цилиндре весь сыпучий материал входит в систему, а во вращающемся – только частицы, находящиеся в поднимающемся или неподвижном слое (зона $ACBM$, рис. 5.5).

При непрерывном дозировании очень важно знать, в каком режиме движется сыпучий материал. Очевидно, что в режиме периодических обрушений из трубы будет высыпаться не непрерывный поток, а отдельные порции. При достижении открытой поверхностью материала угла α_ω (рис. 5.6) первоначально происходит сдвиг материала по линии $A_\omega CB_\omega$, а затем материал из зоны $CNA_\omega A_d$ перемещается в сегмент с открытой поверхностью $A_d B_d$.

Для аналитического описания процесса обрушения сделаны следующие допущения (рис. 5.6, б):

- граница $A_\omega CB_\omega$ изначального сдвига сыпучего материала определяется из условия равенства потенциальной энергии материала, находящегося в зоне $A_\omega CB_\omega M$, минимальной потенциальной энергии системы;
- время перераспределения материала из положения $A_\omega B_\omega$ в положение $A_d B_d$ равно времени движения частицы из точки C_ω в точку C_d (C_ω и C_d – центры тяжести соответственно зон $B_\omega A_\omega A_d C$ и $B_d A_d C B_\omega$).

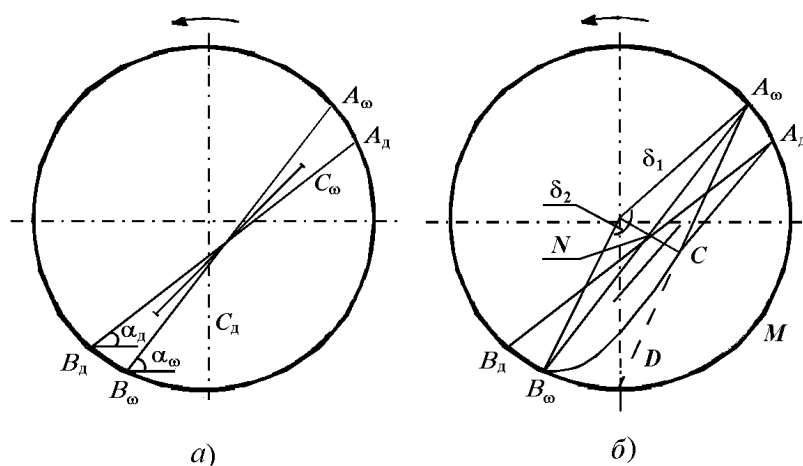


Рис. 5.6. Схема к расчету режима движения сыпучего материала

Угол α_ω наклона открытой поверхности сыпучего материала, при котором происходит переход от состояния покоя к движению, найдем из условия равновесия отдельной частицы [18]:

$$mg \sin \alpha_\omega - f_n mg \cos \alpha_\omega - (m\omega^2 R)(\sin \delta_0 + f_n \cos \delta_0) = 0, \quad (5.2)$$

$$\alpha_\omega = \arcsin \left[\left(\frac{\omega^2 R}{g} \right) \sin(\delta_0 + \alpha_n) \right] + \alpha_n. \quad (5.3)$$

Данная формула наглядно показывает влияние на численное значение угла α_ω основных режимных и геометрических параметров барабана и свойств зернистого материала: радиуса барабана и угловой скорости его вращения, которые учитываются относительной скоростью $\omega^2/\omega_{кр}^2 = \omega^2 R/g$; степени заполнения барабана материалом, угла δ_0 ; угла трения покоя сыпучего материала α_n . Из формулы видно, что если сумма углов α_ω и

δ_0 превышает $\pi/2$, то при прочих равных условиях численное значение угла α_ω уменьшается. Данный факт имеет строгое физическое объяснение, поскольку в рассматриваемом случае точка A_ω находится выше горизонтального диаметра и направление центробежной силы $m\omega^2 R$ не совпадает с направлением силы гравитации.

Далее, используя энергетический подход и зависимости, приведенные в работах [18–20], можно определить границу обрушения, т.е. координаты точки C . Координаты центра тяжести зоны $B_\omega A_\omega A_d C$ определим, как координаты сложной фигуры, состоящей из зоны 1 – $B_\omega NC$, ограниченной отрезком параболы CB_ω и прямыми BN и NC , и зоны 2 – $CNA_\omega A_d$.

5.2.2. ОСЕВОЕ ДВИЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА

При использовании гладких вращающихся барабанов или труб осевое движение зернистого материала определяет производительность дозатора и его точность. Наиболее детальные теоретические и экспериментальные исследования трубчатых дозаторов были проведены в Московском институте химического машиностроения под руководством доцента Ю.А. Репкина. Производительность трубчатого дозатора рассчитывалась по следующей формуле [10, 21]:

$$Q = K\rho\omega d^3, \quad (5.4)$$

где K – коэффициент подачи; ρ – насыпная плотность сыпучего материала, г/см³; ω – угловая скорость вращения трубы, с⁻¹; d – внутренний диаметр трубы, см.

Были получены значения коэффициента подачи для гладких цилиндрических труб и труб, диафрагмированных на выходе. Проведенные экспериментальные исследования показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных. Значения коэффициента подачи K могут быть использованы для расчетов основных параметров дозатора. Регулирование производительности осуществляется изменением угла наклона трубы или диаметра диафрагмы. К недостаткам расчетной зависимости (5.4) следует отнести необходимость экспериментального определения значения коэффициента подачи (K) и невозможность прогнозирования точности дозирования.

В работах [22, 23] для описания движения сыпучего материала вдоль оси гладкого вращающегося барабана использован одночастичный подход. Теоретические и экспериментальные исследования движения сыпучего материала во вращающейся трубе с малым диаметром приводятся в работах [24, 25]. При аналитическом описании осевого движения сыпучего материала авторы данных работ использовали модель, согласно которой осевое перемещение частиц осуществляется за счет их периодического скатывания по открытой поверхности материала, находящегося во вращающемся цилиндре. Экспериментальные исследования проводились на трубе с диаметром 7,62 см и длиной 40 см. Угловая скорость вращения изменялась в диапазоне (0,078...0,366) от критической. В качестве сыпучего материала использовались частицы с диаметрами: 125,5; 214,5; 387,5 мкм. Исследования проводились при трех коэффициентах заполнения трубы сыпучим материалом: 16,2; 27 и 37,8 %. В работах приводится сравнение расчетных параметров с результатами проведенных экспериментов, а также с опытными данными других исследований. Отмечается удовлетворительная сходимость теории и эксперимента. Работы [24, 25] являются весьма интересными, однако они не могут быть использованы для описания неустановившегося режима движения сыпучего материала во вращающемся цилиндре, т.е. когда с течением времени постоянно изменяется степень заполнения цилиндра сыпучим материалом.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований осевого движения сыпучего материала во вращающемся трубчатом дозаторе приводятся в работе [26], при этом были сделаны следующие допущения:

- 1) коэффициент заполнения трубчатого дозатора материалом в данный момент постоянен по всей длине и равен коэффициенту заполнения в конце процесса;
- 2) загрузка материала в трубе движется без проскальзывания относительно трубы, т.е. коэффициент трения между материалом и трубчатым дозатором равен коэффициенту внутреннего трения материала.

Следует отметить, что второе допущение представляется достаточно обоснованным, а первое не может быть использовано при математическом описании процесса преобразования отдельных порций материала в непрерывный поток. Это объясняется тем, что количество сыпучего материала, находящегося в трубе, периодически изменяется, а следовательно, коэффициент заполнения непостоянен во времени.

Экспериментальная проверка полученной зависимости проводилась в серии опытов на трубчатом дозаторе при угловых скоростях его вращения в диапазоне 0,2...0,6 от критической угловой скорости. Коэффициент заполнения изменялся от 0,1 до 0,25. Угол естественного откоса сыпучего материала был равен 45°. В экспериментах использовались трубчатые дозаторы с отношением $L/D > 20$. Для трубчатого преобразователя отдельных порций в непрерывный поток нецелесообразно использовать такие большие отношения L/D . Учитывая это, несмотря на хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений t (отклонение не

превышало 10 %), необходимо экспериментально проверить возможность использования предлагаемых зависимостей при $L/D < 6$.

Таким образом, рассмотренные выше подходы к описанию осевого движения сыпучего материала неприменимы для описания неустановившегося режима движения.

В работе [27] рассмотрено движение частиц при неустановившемся режиме движения, т.е. с учетом изменяющегося во времени распределения частиц предыдущих порций по длине трубы. На рисунке 5.7 показана схема движения частиц сыпучего материала вдоль оси барабана. Рассмотрим перемещение частиц с произвольного участка K . Будем считать, что частицы данного участка переходят из поднимающегося слоя в скатывающийся в точке A_k . Заканчивать свое движение в скатывающемся слое частицы будут в точках B_{k+1} , B_{k+2} и т.д. до точки B_j , которой соответствует максимальный угол ската. На рисунке 5.8 показана схема для расчета угла ската ϵ .

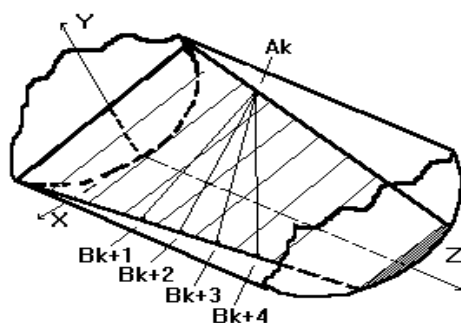


Рис. 5.7. Схема движения СМ вдоль оси барабана

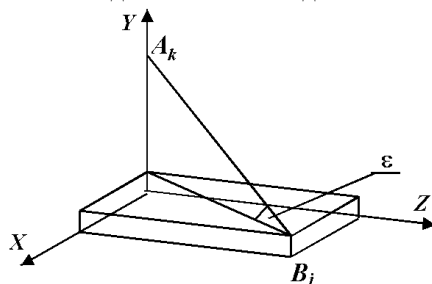


Рис. 5.8. Схема к определению угла максимального ската

Из геометрических соотношений значение угла ϵ определяется по следующей формуле:

$$\epsilon_{kj} = \arctg \left\{ \frac{(Y_{Ak} - Y_{Bj})}{\left[(X_{Bj} - X_{Ak})^2 + (Z_{Bj} - Z_{Ak})^2 \right]^{0,5}} \right\}. \quad (5.5)$$

Изменяя значение j от $k + 1$ в сторону увеличения, находим значение j_{\max} , которому соответствует угол ϵ_{\max} максимального ската. При расчете угла максимального ската достаточно легко учитывать угол наклона оси барабана к горизонту α . В данном случае значения координат Z_{Bj} и Z_{Ak} необходимо рассчитывать по следующим зависимостям:

$$Z_{Ak} = Z'_{Ak} + (N - k)\Delta L \operatorname{tg} \alpha; \quad Z_{Bj} = Z'_{Bj} + (N - j)\Delta L \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.6)$$

Результаты эксперимента показали, что при моделировании процесса движения сыпучего материала вдоль оси вращающейся трубы можно сделать допущение о прямой пропорциональности между количеством материала, поступающего на данный участок, и разницей угла ската для данного участка и предыдущего.

Зависимости, представленные в работе [27], позволяют рассчитывать движение сыпучего материала вдоль оси вращающегося барабана.

5.2.3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ДОЗИРОВАНИЯ

Поскольку при практическом использовании непрерывных дозаторов необходимо рассчитывать минимальный радиус барабана R , радиус загрузочного отверстия r , максимальный объем отдельной порции, а

также время выхода на установившийся режим, было исследовано распределение одной порции во вращающейся трубе. Рассмотрим распределение отдельной порции V , которую загрузили во вращающуюся трубу. Несомненно, что в общем случае загрузка отдельной порции во вращающуюся трубу происходит в течение определенного времени ΔT_L , причем в барабане уже находится некоторое количество материала, однако, как будет показано ниже, эти особенности легко учесть если иметь решение предложенного варианта.

Пусть внутренний радиус барабана равен R , а его длина – L . На рисунке 5.9 показано распределение первой порции в пустой горизонтальной вращающейся трубе.

Для вычисления параметров распределения порции материала воспользуемся схемами, показанными на рис. 5.10. Объем первой порции во вращающейся трубе можно определить следующим образом:

$$V = \iint_D z dx dy. \quad (5.7)$$

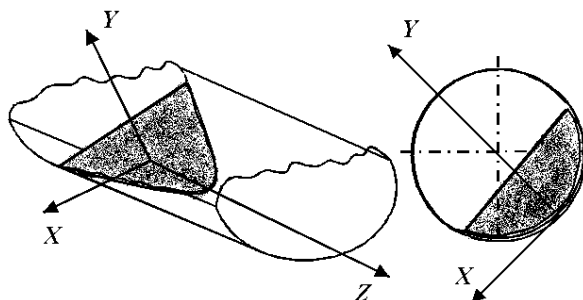


Рис. 5.9. Схема распределения отдельной порции в барабане

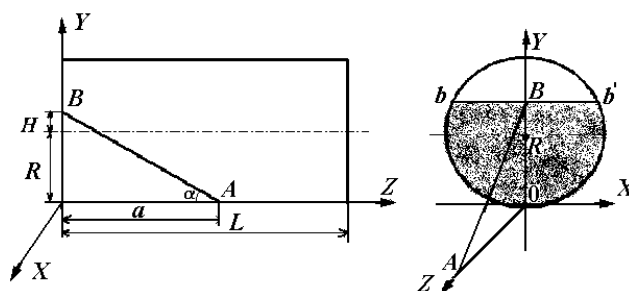


Рис. 5.10. Схемы к расчету распределения первой порции CM во вращающейся трубе

Уравнение плоскости, с которой совпадает открытая поверхность сыпучего материала, имеет вид:

$$Z = a - y \operatorname{ctg} \alpha, \quad (5.8)$$

y изменяется от 0 до $a \operatorname{tg} \alpha$.

Уравнение области D (рис. 5.10)

$$(y - R)^2 + x^2 = R^2, \quad (5.9)$$

откуда получаем границы изменения x

$$\text{от } -[R^2 - (y - R)^2]^{0,5} \text{ до } [R^2 - (y - R)^2]^{0,5} = M.$$

Интеграл (5.7) можно записать следующим образом:

$$V = \iint_D z dx dy = 2 \int_0^{a \operatorname{tg} \alpha} dy \int_0^M (a - y \operatorname{ctg} \alpha) dx = 2 \int_0^{a \operatorname{tg} \alpha} dy [(a - y \operatorname{ctg} \alpha) x]_0^M. \quad (5.10)$$

Подставив $M = [R^2 - (y - R)^2]^{0.5}$ и введя обозначение $a \operatorname{tg} \alpha - R = H$, после преобразований получим [27]:

$$V = \frac{R^2}{\operatorname{tg} \alpha} H \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{H}{R} \right] + \frac{H^2}{\operatorname{tg} \alpha} \sqrt{R^2 - H^2} + \frac{2}{3 \operatorname{tg} \alpha} [R^2 - H^2]^{3/2}. \quad (5.11)$$

При проектировании трубчатого преобразователя порций формула (5.11) позволяет при известном значении V подобрать рациональные значения радиуса трубы R и радиуса входного отверстия $r = H$. Если решается вопрос поиска оптимальных режимных параметров для уже имеющейся конструкции барабанного преобразователя, то по формуле (5.10) можно рассчитать максимальный объем отдельной порции.

Схема распределения порции объемом V на переходе k показана на рис. 5.11. Считаем, что нам известно распределение сыпучего материала по участкам на переходе $k - 1$, т.е. известны численные значения $V_{j, k-1}$.

Предположим, что объем V на переходе k распределился на M_k участков, как это показано на рис. 5.11. Учитывая, что открытая поверхность наклонена к оси z под углом трения движения, величина стрелки h_{ik} сегмента, который занимает материал на участке i , будет равна:

$$h_{ik} = h_{i, m, k-1} + [\Delta L (M_{k-1}) + \Delta L / 2] \operatorname{tg} \alpha_d. \quad (5.12)$$

Объем материала $\Delta V_{i, k}$, который добавился на участок I , определим, как разность объемов $V_{i, k}$ и $V_{i, k-1}$.

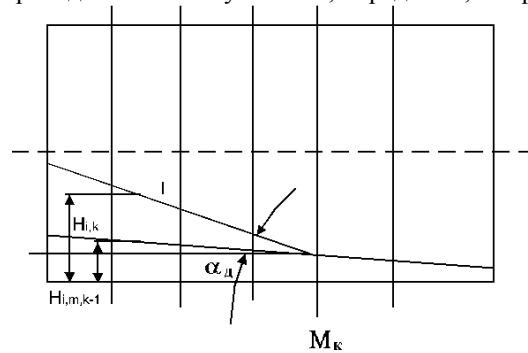


Рис. 5.11. Схема распределения очередной порции материала

Объем $V_{i, k}$ определим по следующей зависимости:

$$V_{i, k} = f(h_{i, k}). \quad (5.13)$$

Найдем расчетное значение объема порции V_p :

$$V_p = \sum V_{i, k}. \quad (5.14)$$

Если $V_p > V$, то необходимо уменьшить значение M_k , если $V_p < V$, то увеличить. Как показали результаты численных экспериментов, целесообразно первоначально принимать $M_k = M_{k-1}$. Поскольку значение M изменяется дискретно, практически невозможно получить $V_p = V$, поэтому целесообразно устанавливать следующее ограничение $[(V - V_p) / V] \leq \varepsilon$, где ε зависит от числа участков, на которые разделена труба. После выполнения данного условия необходимо провести корректировку значений $V_{i, k}$:

$$V_{i, k} = \frac{(V - V_p)}{V} V_{i, k}. \quad (5.15)$$

Как отмечалось ранее, для описания процесса непрерывного дозирования полидисперсного материала используем математический аппарат случайных марковских процессов дискретных в пространстве и во времени. Трубу по длине разделим на k участков. Будем считать, что система состоит из $k + 1$ элементов, где $(k + 1)$ -й элемент показывает, какое количество материала высыпалось из трубы. Состояние системы после перехода m определяется вектором состояния $E(m)$. Координаты вектора есть вероятность нахождения сыпучего материала на участке после перехода m . Данный вектор можно определить, используя следующие соотношения:

$$E(1) = E(0) P(1);$$

$$E(2) = E(1) P(2);$$

... (5.16)

$$E(k) = E(k-1)P(k)$$

...

$$E(m) = E(m-1)P(m),$$

где $E(0)$ – вектор начального состояния; $P(k)$ – матрица переходных вероятностей на переходе k .

Поскольку рассматривается неустановившийся режим движения сыпучего материала, матрица переходных вероятностей будет изменяться во времени, т.е. элементы матрицы будут разными на разных переходах. Объем материала, находящегося на участке j после перехода k , равен объему материала, который находился на данном участке после перехода $k-1$, плюс суммарный объем материала пришедшего с предыдущих участков, и минус суммарный объем материала, который переместился на последующие участки, т.е.

$$V(j, k) = V(j, k-1) + \Delta V_1(j, k) - \Delta V_2(j, k), \quad (5.17)$$

где $\Delta V_1(j, k)$ и $\Delta V_2(j, k)$ – объемы материала, которые соответственно приходят на участок j или уходят с него на переходе k .

С учетом того, что переход материала может происходить не на один участок, для расчета объема материала на участке j после перехода k получена следующая формула:

$$V(j, k) = V(j, m-1) + \sum_{z_1=j-N_1}^j \Delta V_1(z_1) - \sum_{z_2=j+1}^{j+N_2} \Delta V_2(z_2) + u(j, m) - s(j, m), \quad (5.18)$$

где ΔV – объем материала, который приходит на данный участок или уходит с него; z_1 – номер предыдущего участка, с которого материал перемещается на участок j ; z_2 – номер последующего участка, на который материал перемещается с участка i ; N_1 – количество предыдущих участков, с которых материал переходит на участок j ; N_2 – количество последующих участков, на которые материал уходит с участка j ; $u(j, m)$ – объем материала, который приходит на участок j на переходе k в результате подачи в барабан очередной порции; $s(j, k)$ – объем материала, который приходит на участок j или уходит с него на переходе k в результате перемещения частиц устройством для разрушения ядра сегрегации.

Численные значения $s(i, m)$ могут быть как положительные, так и отрицательные, и зависят от геометрических параметров устройства для разрушения ядра сегрегации и режимов его работы.

Очевидно, что с данного участка может переместиться только часть разницы объемов, находящихся на этом участке и на последующем. Количество участков j_{\max} , на которые произойдет перемещение материала, зависит от угла максимального ската (формула 5.5). Объем материала, который переходит с участка j на переходе k , можно рассчитать по следующей формуле:

$$\Delta V(j, k) = \frac{P_1 [V(j, k-1) - V(j+1, k-1)] [h(j, k-1) - h(j+1, k-1)]}{\Delta L}, \quad (5.19)$$

где P_1 – параметр математической модели, характеризующий вероятность перехода частиц с одного участка на другой.

Приведенные выше уравнения представляют собой математическую модель процесса преобразования отдельных порций в непрерывный поток в гладком вращающемся барабане. Последовательность использования модели следующая. По формуле (5.10) рассчитывается объем отдельной порции и распределение этой порции по участкам. Рассчитываются параметры распределения сыпучего материала на каждом участке. Определяется угол максимального ската и участки, на которых происходит перераспределение материала при осевом движении частиц. Далее, последовательно изменяя k от 1 до $m = T/\Delta\tau$, j от 1 до $N+1$ рассчитывается распределение зернистого материала вдоль оси барабана в любой момент времени T и количество материала, которое высыпается из барабана. Следует особо отметить, что расчет распределения сыпучего материала в поперечном сечении каждого участка осуществляется на каждом переходе. При переходах, кратных $\Delta T/\Delta\tau$, производится расчет распределения новой порции по участкам. Формирование проб для прогнозирования точности дозирования осуществляется путем суммирования объемов на участке $N+1$ за $\Delta T_{\text{пр}}/\Delta\tau$ переходов.

Поскольку перемещение частиц вдоль оси происходит при их движении только в скатывающемся слое естественно предположить, что время одного перехода прямо пропорционально времени $\tau_{\text{ц}}$, за которое совершается один цикл циркуляции сыпучего материала в поперечном сечении барабана, т.е.

$$\Delta\tau = P_2 \tau_{\text{ц}}, \quad (5.20)$$

где P_2 – коэффициент пропорциональности.

Численное значение $\tau_{ц}$ легко определить, если известно распределение сыпучего материала в поперечном сечении барабана. Учитывая, что материал распределяется не равномерно по длине барабана, целесообразно использовать среднее значение $\tau_{ц}$ для N участков за $\Delta T/\Delta t$ переходов. Таким образом, в рассмотренной математической модели два параметра (P_1, P_2) подлежат идентификации.

Как отмечалось выше, при расчете процесса двухстадийного дозирования необходимо учитывать погрешность порционного дозирования, отклонения насыпной плотности и углов трения сыпучих материалов. Это можно сделать с помощью имитационного моделирования. В основу имитационной модели положена математическая модель, представленная в предыдущем разделе. Имитация указанных выше отклонений осуществлялась с помощью генератора случайных чисел и фильтров, которые позволяют учитывать распределение отклонений параметров.

5.2.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДВУХСТАДИЙНОГО ДОЗИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ТРУБЫ

Исследования процесса двухстадийного дозирования проводили на лабораторном барабанном дозаторе, схема которого представлена на рис. 5.12.

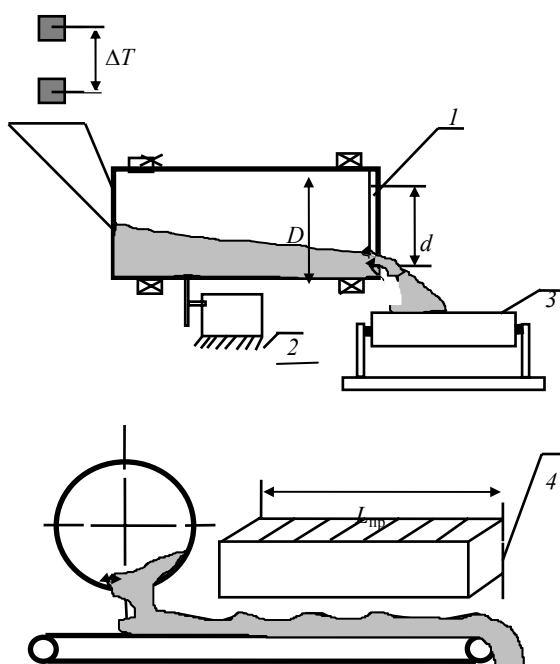


Рис. 5.12. Схема исследования точности дозирования

Была предусмотрена возможность установки сменных труб l с внутренними диаметрами D от 0,042 до 0,15 м и длиной L от 0,1 до 0,45 м. Привод 2 позволял изменять угловую скорость вращения барабана в диапазоне (0,1 до 0,5) от критической. Диаметр диафрагмы, установленной на выходе из трубы, мог изменяться в диапазоне (0,4...1,0) D . Подвижная платформа, на которой установлен барабан 1 , шарнирно соединен с основанием с возможностью изменения угла наклона оси вращения барабана в диапазоне от -5 до $+15^\circ$. Для отбора проб использовали подвижный прободоотборник в виде ленточного транспортера 3 , что позволяло отбирать пробы за короткие (5...10 с) промежутки времени.

Основное внимание уделяли исследованию точности непрерывного дозирования. Методика проведения экспериментов следующая. Подготавливали порции сыпучего материала весом ΔP , которые через равные промежутки времени ΔT высыпали во вращающийся барабан 1 . С помощью секционированного прободоотборника 4 сыпучий материал, находящийся на ленте, разделяли на порции. Каждая порция соответствовала количеству материала ΔQ , высыпавшегося из барабана 1 за отрезок времени

$$\Delta T_{пр} = L_{пр} / Nv,$$

где $L_{пр}$ – длина прободоотборника, м; v – скорость ленты, $мс^{-1}$; N – число секций в прободоотборнике. На первом этапе задача заключалась в идентификации параметров математической модели экспериментальным данным. Для конкретного сыпучего материала при фиксированных значениях $R, L, \omega, \Delta T_{пр}$ проводили несколько серий

параллельных экспериментов и методом последовательных приближений рассчитывали такие значения параметров математической модели, при которых расхождения между расчетными значениями ΔQ и экспериментальными данными были минимальными.

Следующий этап исследования – проверка адекватности математической модели эксперименту. На данном этапе опыты проводили на материалах, для которых были идентифицированы параметры математической модели при различных комбинациях параметров ΔP , ΔT , ω , L , R , α , d_2 . Порядок проведения опытов соответствовал описанному выше. На рисунке 5.13 показаны характерные зависимости равномерности непрерывного потока от режимных параметров работы устройства. На графиках показаны отклонения от заданной производительности непрерывного дозирования 1 г/с при подаче отдельных порций во вращающийся барабан через промежутки времени ΔT , равные соответственно 60, 30, 20 и 10 с. Гистограммы – это расчетные значения производительности, а точки – экспериментальные данные.

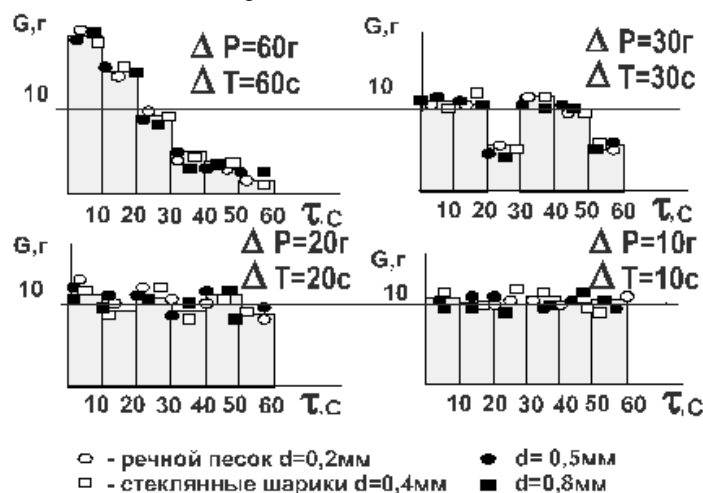


Рис. 5.13. Изменение производительности непрерывного потока во времени

Как видно из графиков, при уменьшении ΔT отклонения от заданной производительности за 10 с уменьшаются, однако точность дозирования при отборе проб за 60 с становится хуже. Аналогичные закономерности были экспериментально установлены и при изменении геометрических параметров дозатора. Таким образом, при расчете оптимальных геометрических и режимных параметров трубчатых дозаторов необходимо учитывать методику оценки точности непрерывного дозирования, которая определяется потребителем.

По результатам теоретических и экспериментальных исследований для расчета оптимальных значений основных режимных и геометрических параметров промышленных установок двухстадийного дозирования сыпучих материалов разработана инженерная методика. Основу методики составляют:

- математическая модель обрушения сыпучего материала при переходе от покоя к движению;
- математическая модель движения СМ в поперечном сечении гладкого вращающегося барабана;
- математическая модель сегрегации полидисперсного материала;
- математическая модель движения СМ вдоль оси барабана;
- имитационная модель процесса преобразования отдельных порций СМ в непрерывный поток.

В качестве исходных данных используются следующие параметры: производительность, точность дозирования (с указанием временного интервала, в течение которого осуществляется отбор одной пробы) и основные характеристики сыпучего материала. Расчет осуществляли в два этапа. На первом этапе, исходя из распределения одной пробы, рассчитываются минимальные значения диаметра, длины и частоты вращения барабана. На втором этапе рассчитываются оптимальные, с точки зрения обеспечения требуемой точности дозирования, параметры барабана.

5.3. ВИБРАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Как преобразователь отдельных порций в непрерывный поток может быть использован наклонный вибрирующий лоток [28]. При вибрации сыпучего материала частицы совершают сложное движение, перемещаясь как в горизонтальной, так и в вертикальных направлениях. Процесс преобразования отдельной порции в непрерывный поток включает в себя изменение формы открытой поверхности отдельной порции, перемещение материала вдоль лотка и соединение отдельных порций между собой. Кроме этого частицы перемещаются относительно друг друга в пределах отдельной порции, а при соединении порций на границе возможен обмен частицами между соседними порциями материала. Учитывая это, данный процесс следует рассматривать, как сложную физико-механическую систему (ФМС) [29]. Анализируя ФМС, можно выделить два уровня иерархии аналогично тому, как это сделано при изучении процесса измельчения и смешения [30]. С

точки зрения конечного результата данного процесса, т.е. достижения максимальной равномерности непрерывного потока в большей степени нас будет интересовать второй иерархический уровень – макроуровень. Для математического описания эффекта второго уровня иерархической структуры ФМС можно учитывать только общие закономерности поведения системы. В нашем случае под системой мы будем понимать совокупность частиц, составляющих порцию материала, которую необходимо преобразовать в непрерывный поток.

В соответствии с общей стратегией системного подхода на первом этапе рассмотрим качественную картину процесса с целью выяснения общих закономерностей.

5.3.1. КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ ПОРЦИИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА НА НАКЛОННОМ ВИБРИРУЮЩЕМ ЛОТКЕ

Для выявления общих закономерностей поведения совокупности контактирующих друг с другом частиц на наклонном вибрирующем лотке была проведена видеосъемка рассматриваемого процесса [31]. На рисунке 5.14 дана фотография лабораторной установки.

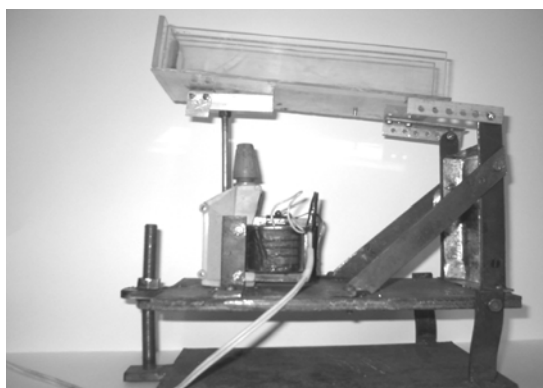


Рис. 5.14. Лабораторная установка

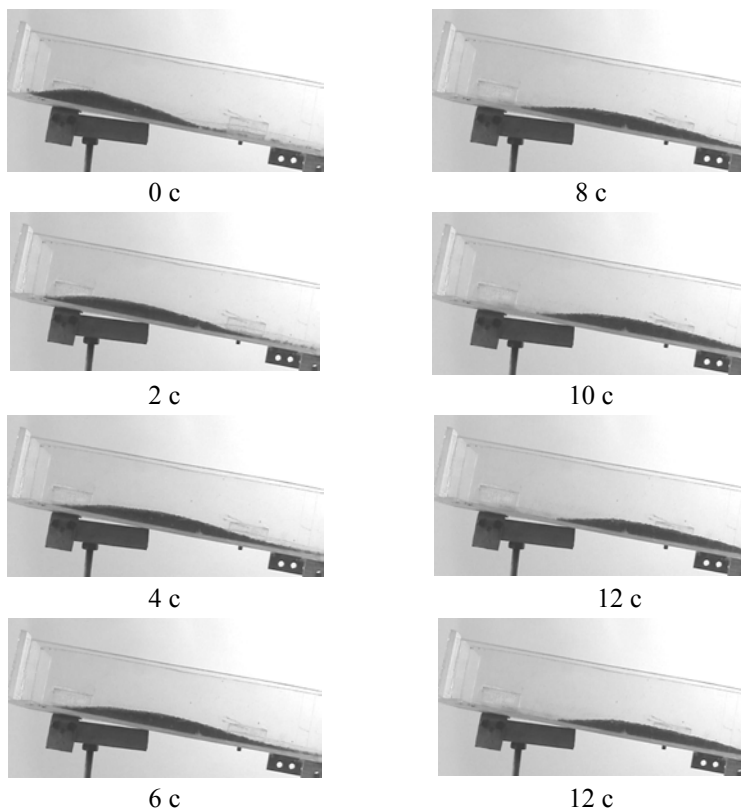


Рис. 5.15. Разложение по кадрам видеозображения процесса движения порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку

На рисунке 5.15 показаны результаты видеосъемки процесса движения порции зернистого материала (семян люцерны). Снимки даны через равные промежутки времени $\Delta t = 2$ с.

Как видно из фотоснимков, порция материала перемещается вдоль лотка от загрузочного края к разгрузочному и одновременно изменяется форма открытой поверхности зернистого материала. Кривая, ограничивающая продольное сечение материала, похожа на полуволну синусоиды, причем с течением времени амплитуда этой синусоиды уменьшается, а период увеличивается. Расстояние от центра тяжести зернистого материала до поверхности лотка в процессе движения уменьшается, а масса порции до момента начала падения частиц с лотка остается неизменной.

Таким образом, качественный анализ показал, что процесс преобразования отдельной порции сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке можно рассматривать, как совокупность двух независимых процессов: изменение формы продольного сечения порции сыпучего материала на лотке; перемещение центра тяжести порции сыпучего материала вдоль лотка. Рассмотрим более подробно каждый из указанных процессов.

5.3.2. ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ ПРОДОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ОТДЕЛЬНОЙ ПОРЦИИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВИБРАЦИИ

При дальнейшем описании движения сыпучего материала на вибрирующем лотке воспользуемся результатами, представленными в работе [31]. В результате визуальных наблюдений процесса изменения формы продольного сечения порции сыпучего материала на вибрирующем лотке было установлено, что расстояние от центра тяжести сыпучего материала до поверхности лотка в процессе движения уменьшается, а масса порции до момента начала падения частиц с лотка остается неизменной. Ранее [17] была выдвинута гипотеза, что система, представляющая собой совокупность большого числа контактирующих частиц, при своем движении в преобладающем поле гравитационных сил стремится, а при установившемся режиме движения достигает такого положения, при котором ее потенциальная энергия минимальна. Численное значение минимума определяется границами, в которых находится данная система. Для случая установившегося режима гипотеза была экспериментально проверена при движении сыпучего материала в гладком вращающемся барабане. Позже [27] эта гипотеза экспериментально проверена и для неустановившегося режима (режим циклических обрушений) движения сыпучего материала в горизонтальном вращающемся цилиндре. В рассматриваемом нами случае нет ограничений (кроме временных) на то, чтобы система относительно лотка имела практически нулевую потенциальную энергию. Действительно, если предположить, что лоток имеет неограниченную длину, т.е. отсутствует временное ограничение процесса, то частицы распределятся слоем с высотой, равной диаметру отдельной частицы. В данной ситуации потенциальная энергия относительно поверхности лотка практически равна нулю.

Известно, что потенциальную энергию системы можно найти только с точностью до произвольного постоянного слагаемого. В каждой конкретной задаче для получения однозначной зависимости потенциальной энергии системы от ее конфигурации выбирают нулевую конфигурацию, в которой потенциальную энергию полагают равной нулю. В рассматриваемом случае считали, что нулевой уровень – это поверхность лотка, т.е. условно это такая конфигурация системы, при которой положение ее центра тяжести совпадает с поверхностью лотка. С учетом сделанных замечаний была выдвинута следующую гипотезу: система, представляющая собой совокупность контактирующих частиц, находящихся на вибрирующей пластине в поле гравитационных сил, стремится к состоянию, соответствующему возможному минимуму потенциальной энергии, причем скорость изменения потенциальной энергии системы пропорциональна разности потенциальных энергий рассматриваемого и конечного состояния (минимума потенциальной энергии). С математической точки зрения это выглядит следующим образом: если $W_p = f(t)$, то $\frac{df(t)}{dt} = KW_p$, т.е. первая производная от функции прямо пропорциональна самой функции. Учитывая, что функция во времени убывает, решение искали в виде:

$$y = Ke^{-\beta\sqrt{t}}, \quad (5.21)$$

где K – коэффициент пропорциональности; β – коэффициент затухания.

Воздействие на порцию уменьшается по мере ее продвижения вниз по наклонному лотку, поскольку амплитуда колебаний линейно уменьшается по длине лотка, следовательно, β в соотношении (5.21) будет непостоянным по длине лотка. Было сделано предположение, что β , так же как и амплитуда, зависит от перемещения, т.е. определяется зависимостью:

$$\beta(S) = \beta_0 - K_\beta S, \quad (5.22)$$

где β_0 – начальное значение коэффициента затухания; K_β – коэффициент пропорциональности.

Проверку гипотезы о характере изменения потенциальной энергии проводили следующим образом. Использовалась установка, показанная на рис. 5.16.



Рис. 5.16. Установка для исследования характера изменения потенциальной энергии порции сыпучего материала

В центр короба, расположенного на вибраторе вертикального действия, загружалась порция сыпучего материала. Одновременно с началом вибровоздействия начинали видеосъемку процесса движения сыпучего материала в коробе. Характерные результаты эксперимента представлены на рис. 5.17 в виде разложения по кадрам видеоизображения процесса.

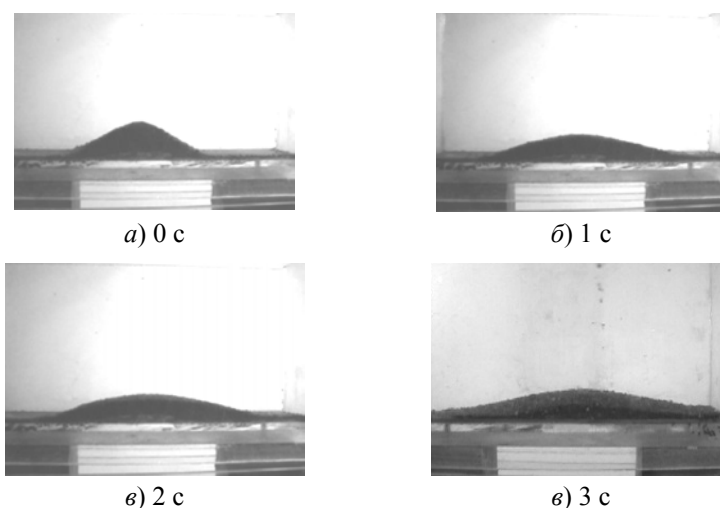


Рис. 5.17. Изменение формы открытой поверхности порции сыпучего материала

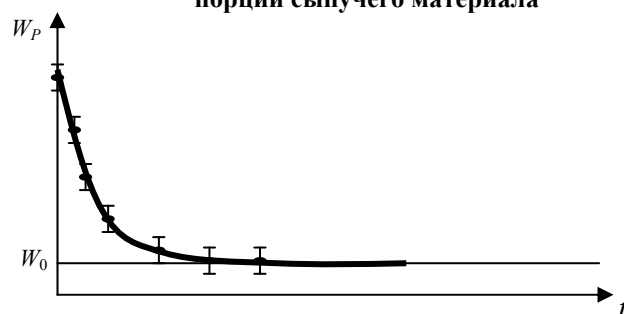


Рис. 5.18. Изменение потенциальной энергии порции сыпучего материала при вибрации

В данном случае за нулевой уровень принимали горизонтальную линию, проходящую через центр тяжести сыпучего материала, находящегося в коробе, у которого открытая поверхность горизонтальна. Данная нулевая конфигурация действительно соответствует минимальному значению потенциальной энергии системы (определенного количества сыпучего материала) в рассматриваемых границах (прямоугольный короб).

По материалам видеосъемки, используя программу AutoCAD, определяли положение центра тяжести сыпучего материала, а затем расстояние между этим положением и нулевым уровнем. По результатам строили зависимость $W_p = f(t)$, показанную на рис. 5.18.

На рисунке 5.18 сплошной линией показана расчетная зависимость. Как видно из графика, наблюдается удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных. Это говорит о том, что предложенная гипотеза соответствует действительности и может быть использована при дальнейшем моделировании процесса.

Для математического моделирования процесса двухстадийного дозирования целесообразно от закономерности изменения потенциальной энергии перейти к закономерности изменения кривой, описывающей открытую поверхность отдельной порции сыпучего материала.

Ранее было отмечено, что в продольном сечении кривая, ограничивающая порцию сыпучего материала сверху, по виду напоминает полуволну синусоиды. На рисунке 5.19 показана порция сыпучего материала, ограниченная снизу поверхностью лотка, а сверху полуволной синусоиды.

Уравнение синусоиды запишем в виде $y = A \sin \omega t$, учитывая, что $\omega = 2\pi/T$, можно записать

$$y(t) = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (5.23)$$

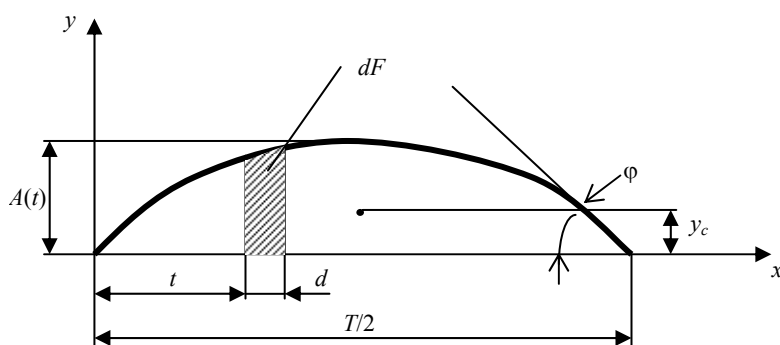


Рис. 5.19. Продольное сечение порции сыпучего материала

Для нахождения координаты центра тяжести сыпучего материала определим статический момент площади. Для этого на произвольном расстоянии t выделим элементарную площадь dF . По определению, статический момент площади относительно горизонтальной оси – это интеграл вида

$$S_t = \int_F y_c(t) dF, \quad (5.24)$$

где $y_c(t)$ – координаты центра тяжести элементарной площади.

Учитывая, что $dF = y(t) dt$, а $y_c(t) = y(t)/2$, запишем выражение (5.24) в следующем виде:

$$S_t = \int_0^{T/2} \frac{1}{2} A \sin \frac{2\pi}{T} t \cdot A \sin \frac{2\pi}{T} t dt. \quad (5.25)$$

Координату центра тяжести площади, находящейся под полуволной синусоиды, можно определить, используя зависимость

$$y_c = \frac{S_t}{F}. \quad (5.26)$$

Площадь под кривой можно определить следующим образом:

$$F = \int_0^{T/2} A \sin \frac{2\pi}{T} t dt = \frac{AT}{\pi}, \quad (5.27)$$

тогда

$$y_c = \frac{\int_0^{T/2} \frac{1}{2} A^2 \left(\sin \frac{2\pi}{T} t \right)^2 dt}{\int_0^{T/2} A \sin \frac{2\pi}{T} t dt} = \frac{A \left[\frac{1}{2} t - \frac{T}{8\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t \right] \Big|_0^{T/2}}{2 \left[-\frac{T}{2\pi} \cos \frac{2\pi}{T} t \right] \Big|_0^{T/2}} = \frac{A\pi}{8}. \quad (5.28)$$

Будем считать, что угол наклона открытой поверхности сыпучего материала к горизонту на краю синусоиды равен углу трения движения сыпучего материала. С математической точки зрения это означает, что первая производная функции $y(t)$ при $t=0$ равна тангенсу угла трения сыпучего материала:

$$y'(t) = A \frac{2\pi}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t, \quad \text{при } t=0 \quad \cos \frac{2\pi}{T} t = 1,$$

тогда

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi A_0}{T_0}. \quad (5.29)$$

С учетом (5.27) можно записать:

$$T_0 = \frac{F\pi}{A_0}. \quad (5.30)$$

Подставим данное выражение в выражение (5.29) и после преобразования получим

$$A_0 = \sqrt{\frac{F \operatorname{tg} \varphi}{2}}. \quad (5.31)$$

Изменение потенциальной энергии сыпучего материала описывается зависимостью (5.21). Из формулы (5.28) видно, что координата центра тяжести, а, следовательно, и потенциальная энергия однозначно и линейно зависят от амплитуды синусоиды. Отсюда можно сделать вывод о том, что функциональная зависимость амплитуды от времени имеет тот же вид, что и зависимость потенциальной энергии от времени. Следовательно, можно записать:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta \sqrt{t}}. \quad (5.32)$$

В соответствии с уравнением (5.30)

$$T(t) = \frac{F\pi}{A(t)}. \quad (5.33)$$

С учетом (5.32) уравнение кривой, описывающей верхнюю границу порции сыпучего материала в процессе вибрации, запишем в следующем виде

$$y(t) = A_0 e^{-\beta(S)\sqrt{t}} \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (5.34)$$

Данная формула позволяет найти количество материала ΔQ , которое ссыпается с лотка за интервал времени Δt $\left(\Delta Q = \int_{t-\Delta t}^t y(t) dt \right)$, при условии, что в момент времени $t - \Delta t$ интересующее нас поперечное сечение порции сыпучего материала находится на ссыпавшем краю лотка.

Таким образом, получена аналитическая зависимость для описания открытой поверхности порции сыпучего материала. Теперь рассмотрим процесс движения центра тяжести порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку.

5.3.3. ДВИЖЕНИЕ ЦЕНТРА ТЯЖЕСТИ ПОРЦИИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ВДОЛЬ ЛОТКА

Для качественной оценки процесса движения центра тяжести отдельной порции сыпучего материала вдоль наклонного вибрирующего лотка были проведены следующие эксперименты. Над загрузочной частью лотка

неподвижно относительно основания укрепили воронку, через которую на вибрирующий лоток подавали отдельные порции сыпучего материала и проводили видеосъемку процесса движения. Характерные результаты съемки представлены на рис. 5.20. По материалам видеосъемки в фиксированные моменты времени визуально определяли положение центра тяжести порции сыпучего материала на лотке.

Как видно из рис. 5.21, по мере продвижения материала вдоль лотка перемещение центра тяжести за равные промежутки времени уменьшается. Учитывая, что амплитуда колебаний линейно уменьшается от загрузочного края к разгрузочному, было сделано предположение о том, что ускорение движения центра тяжести также линейно уменьшается по длине лотка, т.е. если

$$A(S) = A_{0L} - k_A S, \text{ то } a(S) = a_0 - k_a S, \quad (5.35)$$

где A_{0L} – амплитуда колебаний лотка в сечении, где осуществляется загрузка порции сыпучего материала; a_0 – ускорение центра тяжести порции сыпучего материала в сечении лотка, где осуществляется загрузка порции; k_A и k_a – коэффициенты пропорциональности.

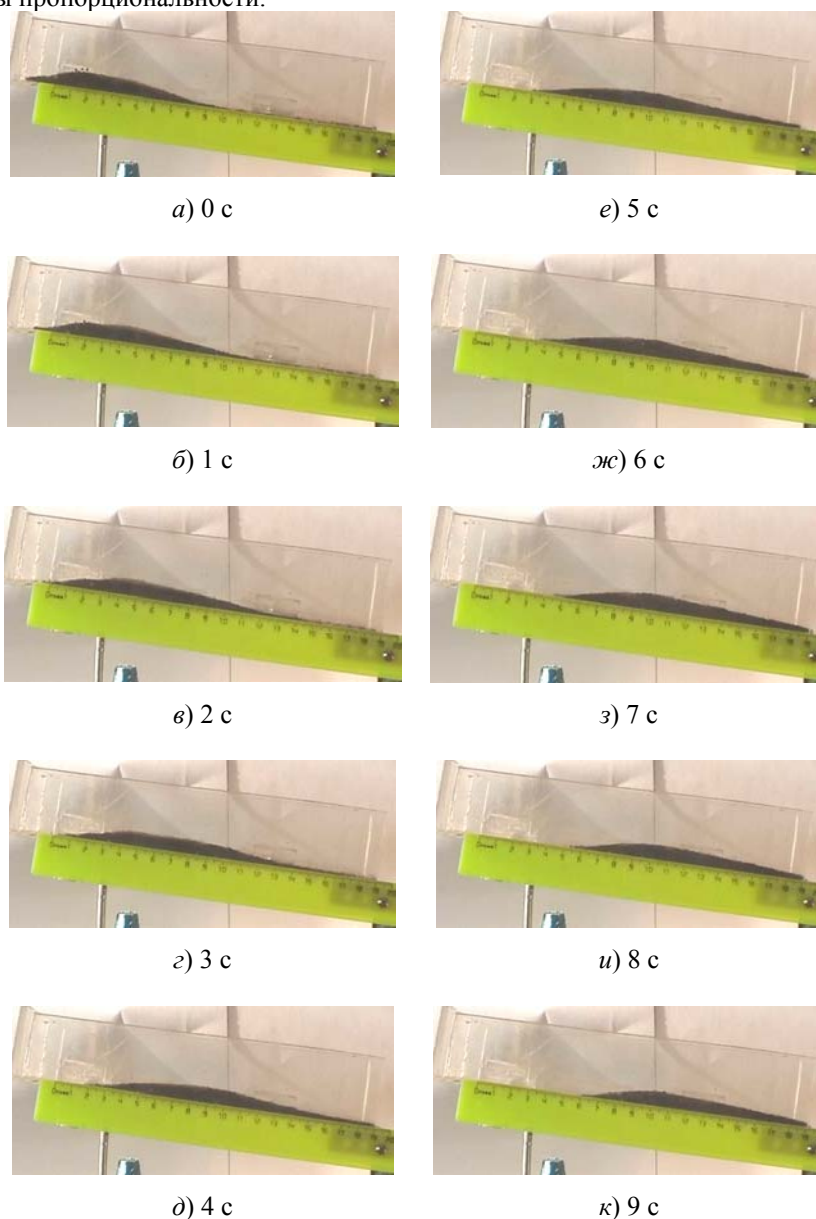


Рис. 5.20. Разложение по кадрам видеозображения процесса движения порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку

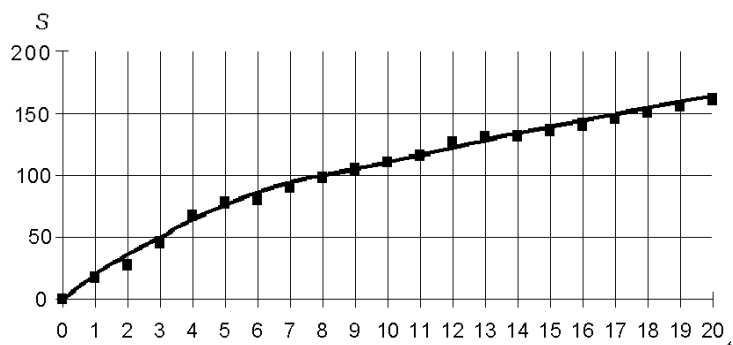


Рис. 5.21. График зависимости $S(t)$

Зная закон изменения ускорения по длине лотка можно получить зависимость пути S от времени. Если $a(S) = a_0 - k_a S$, где $k_a = \frac{a_0}{L_0}$, то можно сделать следующие преобразования:

$$\frac{da}{dS} = -k_a \quad \text{и} \quad \frac{da}{ds} = \frac{a'(t)}{S'(t)} \Rightarrow a'(t) + k_a S'(t) = 0.$$

Учитывая, что $a'(t) = V''(t)$, $S'(t) = V(t)$, находим $V''(t) + k_a V(t) = 0$, откуда

$$V(t) = C_1 \cos(\sqrt{k_a} t) + C_2 \sin(\sqrt{k_a} t).$$

Следовательно:

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{k_a}} C_1 \sin(\sqrt{k_a} t) - \frac{1}{\sqrt{k_a}} C_2 \cos(\sqrt{k_a} t) + C_3.$$

Удовлетворим начальным условиям:

$$S(0) = 0 \Rightarrow C_2 = \sqrt{k_a} C_3,$$

$$a(0) = a_0 \Rightarrow C_3 = \frac{a_0}{k_a} \Rightarrow C_2 = \frac{a_0}{\sqrt{k_a}},$$

получим

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{k_a}} C_1 \sin(\sqrt{k_a} t) + \frac{1}{k_a} a_0 (1 - \cos(\sqrt{k_a} t)).$$

Тогда

$$V(t) = C_1 \cos(\sqrt{k_a} t) + \frac{1}{\sqrt{k_a}} \sin(\sqrt{k_a} t).$$

Если при $t = 0$ $V = V_0$, то $C_1 = V_0$.

Окончательно функция перемещения запишется в следующем виде:

$$S(t) = \frac{1}{\sqrt{k_a}} V_0 \sin(\sqrt{k_a} t) + \frac{1}{k_a} a_0 (1 - \cos(\sqrt{k_a} t)). \quad (5.36)$$

В данной зависимости три параметра (V_0 , k_a , a_0) подлежат идентификации. Определение численных значений данных параметров осуществляли для каждого конкретного сыпучего материала, при фиксированном угле наклона лотка к горизонту. Другими словами, для каждой комбинации сыпучий материал–угол наклона определялись свои значения параметров. На рисунке 5.22 представлены результаты сравнения расчетных

(сплошные линии) и экспериментальных данных (точки) по движению центра тяжести порции сыпучего материала.

Как видно из графиков, в начале лотка наблюдается удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных данных, причем, при больших углах наклона лотка к горизонту (кривая 3) продолжительность участка наибольшей адекватности модели больше, чем при меньших углах (кривая 1). Более того в соответствии с зависимостью (5.36) при малых углах наклона лотка к горизонту центр тяжести порции сыпучего материала не достигает ссыпавшего края лотка, что не соответствует действительности. Однако, если сделать допущение о том, что после начала ссыпания материала с лотка центр тяжести порции сыпучего материала движется с постоянной скоростью, то полученная зависимость удовлетворительно описывает процесс движения центра тяжести порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку. Основным недостатком данной модели является то, что она не может быть использована в ряде случаев, имеющих место при промышленном использовании вибрационных преобразователей, в частности, при нулевой начальной скорости ($V_0 = 0$).

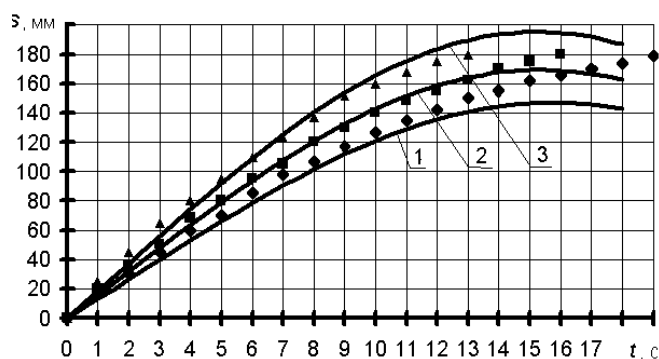


Рис. 5.22. Перемещение центра тяжести порции сыпучего материала вдоль наклонного вибрирующего лотка при углах наклона его к горизонту:
 ◆ 1 – $\alpha = 9^\circ$; ■ 2 – $\alpha = 11^\circ$; ▲ 3 – $\alpha = 13^\circ$

Для устранения недостатков данной физической модели автор работы [31] воспользовался подходом к описанию процесса движения тел под действием вибрации, который основан на рассмотрении процесса движения как дискретного, т.е. движение тела складывается из множества независимых перемещений, причем время одного перемещения равно периоду колебания. Для детального описания данного процесса был проведен ряд исследований, в которых на первом этапе вместо сыпучего материала использовалось твердое тело [32]. На рисунке 5.23 показана схема действующих сил на твердое тело, расположенное на наклонном лотке.

При отсутствии вибрации и угле наклона лотка меньше, чем угол трения покоя, тело неподвижно. Вибрационное воздействие, перпендикулярное к поверхности лотка, позволяет на определенном полупериоде колебания (лоток движется вниз) уменьшить силу нормального давления, а следовательно, и силу трения до такого значения, что тело начнет свое движение под действием скатывающей силы $mg \sin \alpha$, причем будет двигаться с переменным положительным ускорением. Затем (лоток движется вверх) тело будет двигаться с переменным отрицательным ускорением вплоть до остановки. Графически силовое воздействие силы инерции можно представить следующим образом (рис. 5.23).

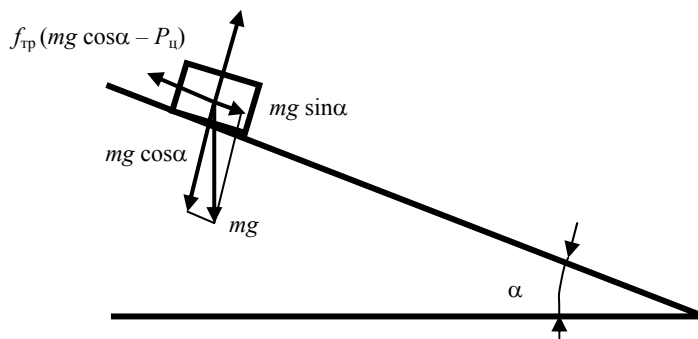


Рис. 5.23. Схема сил, действующих на твердое тело, находящееся на наклонном вибрирующем лотке

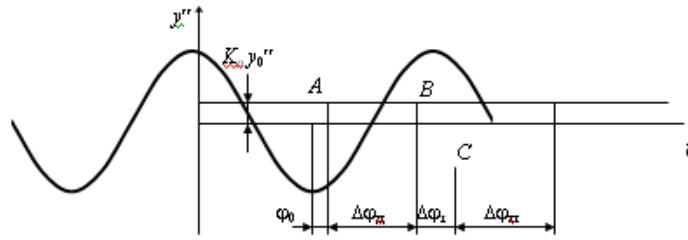


Рис. 5.24. Изменение ускорения движения тела в направлении, перпендикулярном к поверхности лотка

Если положительного ускорения $K_p a > K_p y''$ достаточно для того, чтобы преодолеть силу трения и обеспечить движение тела вниз по наклонному лотку, то на протяжении $\Delta\varphi_d$ тело будет двигаться с переменным положительным ускорением (от точки A до точки B). На участке от точки B до точки C тело будет двигаться с отрицательным ускорением и в точке C остановится. На участке от точки C до точки A тело будет неподвижно, а затем цикл движения повторится. Ускорение движения тела от точки A до точки C можно определить, используя следующее соотношение

$$ma = mg \sin \alpha - f_{\text{тр}}(mg \cos \alpha + my''(t)). \quad (5.37)$$

Поскольку для начала движения необходимо преодолеть силу трения, ускорение на участке разгона определяется следующим образом:

$$a = g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha + \omega^2 A_0 \sin(\omega t) - K_p A_0. \quad (5.38)$$

Скорость тела в конце участка разгона будет равна

$$V_1 = (g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha) \Delta t_1 - \omega A_0 \cos(\omega t) \Big|_{t_0}^{t_0 + \Delta t_1} - K_p A_0 \Delta t_1. \quad (5.39)$$

Скорость тела в конце участка торможения можно определить, используя зависимость

$$V_2 = V_1 + (g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha) \Delta t_2 - \omega A_0 \cos(\omega t) \Big|_{t_0 + \Delta t_1}^{t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2} - K_p A_0 \Delta t_2. \quad (5.40)$$

Если $V_2 = 0$, то

$$V_1 = -(g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha) \Delta t_2 + \omega A_0 \cos(\omega t) \Big|_{t_0 + \Delta t_1}^{t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2} + K_p A_0 \Delta t_2. \quad (5.41)$$

Приравняем (5.39) и (5.41), получим

$$\begin{aligned} (g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha) \Delta t_1 - \omega A_0 \cos \omega(t_0 + \Delta t_1) + \omega A_0 \cos \omega t_0 - K_p A_0 \Delta t_1 = \\ = -(g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha) \Delta t_2 + \omega A_0 \cos \omega(t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_2) - \\ - \omega A_0 \cos \omega(t_0 + \Delta t_1) - K_p A_0 \Delta t_2. \end{aligned} \quad (5.42)$$

Анализ показывает, что данное равенство справедливо при выполнении двух условий: $g \sin \alpha - f_{\text{тр}} g \cos \alpha = 0$ и $K_p A_0 = 0$. Учитывая постановку задачи, данные условия невыполнимы, следовательно, Δt_2 всегда меньше Δt_1 . Следует отметить, что участок торможения всегда меньше чем участок разгона. Численное решение уравнения (5.42) в диапазоне изменения углов наклона лотка к горизонту и амплитуд колебаний по длине лотка показало, что участок торможения составляет от 0,54 до 0,43 от времени разгона. Учитывая незначительное влияние на общее время движения, будем оценивать время движения по времени

разгона. Поскольку амплитуда колебаний лотка уменьшается по его длине, то также будет уменьшаться время движения тела за одно колебание пластины.

Для определения времени движения за одно колебание рассмотрим участок разгона, который представлен на рис. 5.25.

Функция, описывающая ускорение колебаний лотка в точке загрузки порции, может быть записана в виде $y_1 = A_{0L} \sin \alpha_1$, а на расстоянии S как $y_2 = (A_{0L} - k_L S) \sin \alpha_2$. Тогда для определения $\Delta t(S)$ необходимо решить следующую пропорцию:

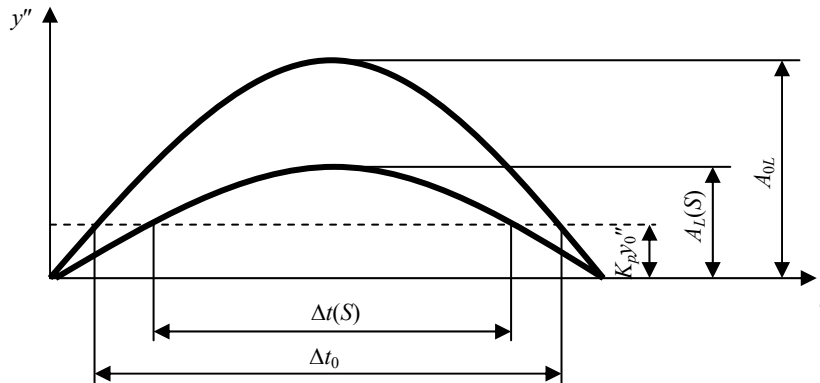


Рис. 5.25. Схема к расчету времени движения за одно колебание лотка

$$\frac{\Delta t(S)}{\Delta t_0} = \frac{\pi - 2\alpha_1}{\pi - 2\alpha_2},$$

где $\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{K_p y_0''}{a_{0L} - k_a S}\right)$; $\alpha_2 = \arcsin(K_p)$.

Окончательно получим:

$$\Delta t(S) = \frac{\pi - 2 \arcsin \frac{K_p y_0''}{a_0 - k_a S}}{\pi - 2 \arcsin K_p} \Delta t_0, \quad (5.43)$$

где K_p, k_a – коэффициенты пропорциональности; y_0'' – ускорение, перпендикулярное к поверхности лотка в точке загрузки порции сыпучего материала, м/с^2 ; S – путь, пройденный центром тяжести твердого тела, м ; Δt_0 – дискретная величина промежутка времени, с .

Для описания процесса движения твердого тела по наклонному лотку в дискретной форме, исходя из теоретического анализа процесса, были сделаны [31] следующие допущения:

1. За период одного колебания лотка тело движется с некоторой постоянной скоростью, т.е. тело за отрезок времени Δt пройдет путь

$$\Delta S = \langle V \rangle \Delta t, \quad (5.44)$$

где $\langle V \rangle$ – средняя скорость, м/с ; Δt – время движения за интервал времени Δt , с .

2. Средняя скорость, пропорциональная пройденному пути, т.е. расстоянию от загрузочного края до центра тяжести тела, на последующем периоде колебания уменьшается:

$$\langle V \rangle = \langle V_0 \rangle - K_v S, \quad (5.45)$$

где $\langle V_0 \rangle$ – средняя начальная скорость, мм/с ; K_v – коэффициент пропорциональности.

3. Время движения Δt уменьшается по длине лотка в соответствии с (5.43).

Исходя из данных допущений, были разработаны алгоритм и программа расчета на ПЭВМ. Для проверки адекватности предложенной модели провели серию экспериментов.

Методика эксперимента заключалась в следующем. В наклонный лоток (рис. 5.26) помещалось твердое тело (стальной параллелепипед размером $20 \times 15 \times 10$ мм), как показано на рис. 5.26, а. Включали вибратор и проводили видеосъемку процесса движения (видеокамера Panasonic NV-DS65). Полученное изображение раскладывалось на отдельные кадры. По полученным видеоматериалам определяли положение центра тяжести

твердого тела в каждый конкретный момент времени. Затем процесс повторяли снова, чтобы получить среднее значение координаты центра тяжести твердого тела при фиксированных параметрах процесса (угол наклона лотка, амплитуда вибрации загрузочного края лотка, частоты колебаний лотка). По полученным средним экспериментальным значениям проводили идентификацию параметров (V_0 , K_p). На рисунке 5.27 сплошной линией показана функция $S(t)$, полученная по модели, а точками – экспериментальные данные.

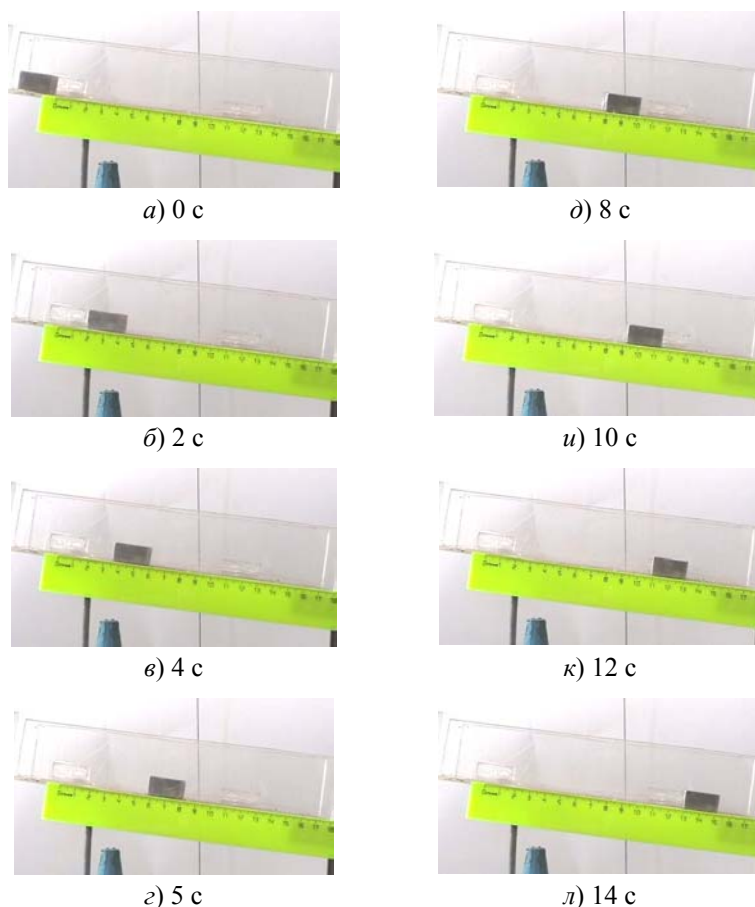


Рис. 5.26. Разложение по кадрам видеозображения процесса движения твердого тела по наклонному вибрирующему лотку

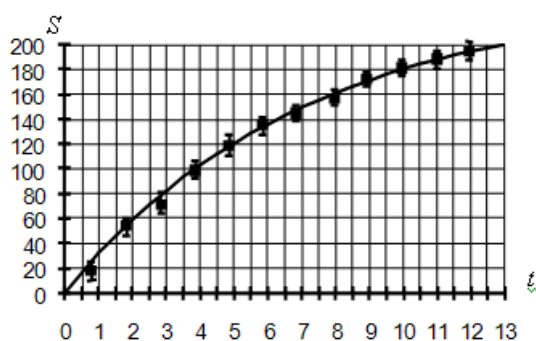


Рис. 5.27. Экспериментальные (точки) и расчетные (линия) данные движения центра тяжести твердого тела

Анализ результатов расчета по данному алгоритму и их сравнение с экспериментальными данными показали, что значение скорости $\langle V_0 \rangle$ прямо пропорционально синусу угла наклона лотка к горизонту, а значение K_p прямо пропорционально косинусу данного угла. Эти закономерности не противоречат физической сущности рассматриваемого процесса. Действительно, ускорение движения тела, а следовательно, и скорость прямо пропорциональны синусу угла наклона лотка к горизонту, сила трения прямо пропорциональна косинусу данного угла.

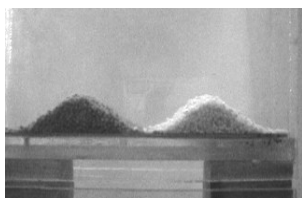
При переходе от модели движения центра тяжести твердого тела к модели движения центра тяжести порции сыпучего материала вдоль наклонного вибрирующего лотка были приняты следующие допущения [31]:

- на протяжении каждого цикла движения центр тяжести ускоряется, затем затормаживается и в конечном итоге скорость его перемещения становится равной нулю;
- средняя скорость движения, в пределах одного цикла, изменяется линейно по длине лотка, уменьшаясь от загрузочного к разгрузочному краю;
- время движения центра тяжести с указанной средней скоростью, в пределах одного цикла, уменьшается при перемещении его от загрузочного к разгрузочному краю согласно уравнению (5.43);
- после начала ссыпания материала с лотка центр тяжести порции сыпучего материала движется с постоянной скоростью, равной скорости его движения на момент начала ссыпания.

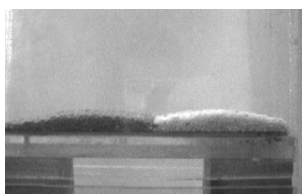
Как и в модели движения отдельного твердого тела, в математической модели движения отдельной порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку идентификации подлежат два параметра V_0 и K_p . Экспериментально было подтверждено [33], что средняя скорость движения центра тяжести порции сыпучего материала прямо пропорциональна синусу угла наклона лотка к горизонту, а значение K_p прямо пропорционально косинусу того же угла.

5.3.4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ ПОРЦИЙ В НЕПРЕРЫВНЫЙ ПОТОК

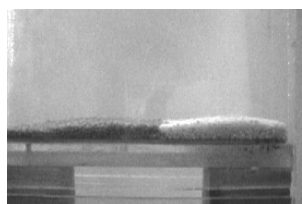
Процесс преобразования отдельных порций в непрерывный поток, помимо изменения формы и движения отдельной порции сыпучего материала, включает в себя объединение двух соседних порций. Данный процесс может быть описан с использованием математического аппарата случайных марковских процессов, дискретных в пространстве и времени. Детальное рассмотрение данного процесса выполнено в работе [31]. Предварительное исследование процесса объединения порций проводилось с использованием прозрачного короба, показанного на рис. 5.28.



а)

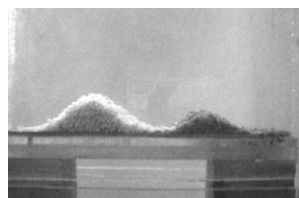


б)

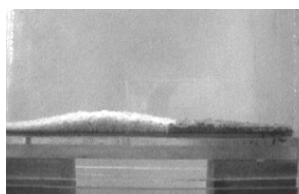


в)

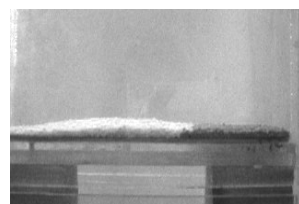
Рис. 5.28. Соединение порций (одинаковый объем порций)



а)



б)



в)

Рис. 5.29. Соединение порций (разный объем порций)

В короб засыпались две порции равного объема одного и того же сыпучего материала, отличающиеся по цвету, как показано на рис. 5.28, а. Затем включали вибратор и проводили видеосъемку, результаты которой представлены на рис. 5.28, б, в. Как видно из снимков, при соединении порций образуется строгая граница.

Иная картина складывается при загрузке порций с разными объемами, как это показано на рис. 5.29, а, б, в. Как видно из рисунка, материал из порции с большим объемом накладывается на материал из порции меньшего объема. Аналогичная картина складывается при соединении двух порций в районе разгрузочного края лотка (рис. 5.30).

По результатам экспериментов было сделано допущение о том, что в процессе преобразования порций сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке поведение отдельных порций можно считать независимым, а результирующее количество сыпучего материала на интервале объединения порций рассматривать как сумму двух независимых функций.

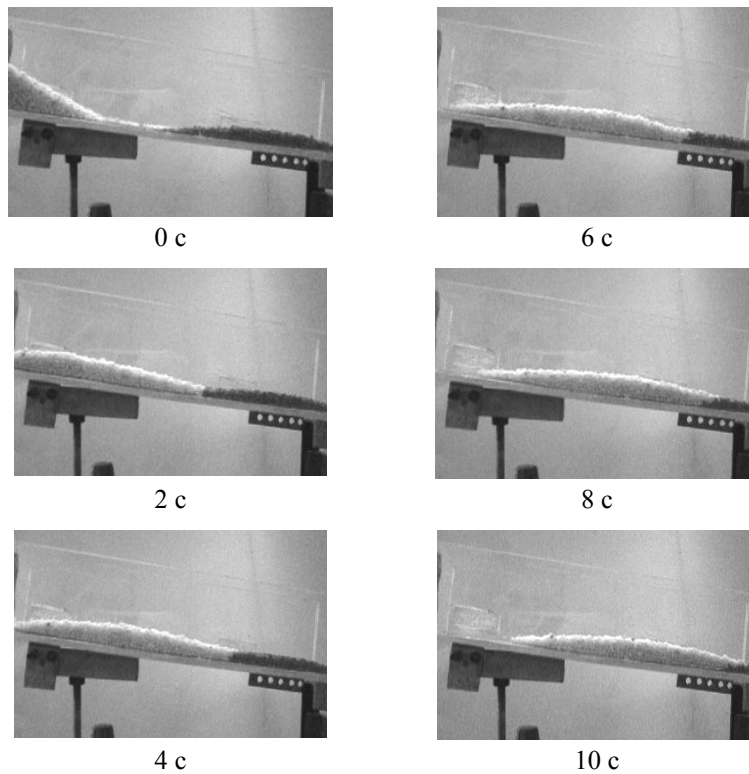


Рис. 5.30. Соединение порций на наклонном лотке

С учетом сделанного допущения процесс преобразования отдельных порций в непрерывный поток был представлен в следующем виде. Через равные промежутки времени ΔT в загрузочную часть лотка подается i -я порция материала. Для конкретного сыпучего материала форма и объем порции (при единичной ширине лотка – площадь продольного сечения) однозначно определены амплитудой A_0 (5.31) и полупериодом $T_0/2$ (5.30). С течением времени t центр тяжести i -й порции сыпучего материала перемещается вдоль лотка. Поскольку процесс рассматривается как дискретный (время t изменяется дискретно с шагом Δt), то на каждом переходе, т.е. для каждого нового значения времени t , по зависимостям (5.32) и (5.33) рассчитывается амплитуда $A(t)$ и полупериод $T(t)/2$. Координаты центра тяжести и амплитуды предыдущей порции $i-1$ и последующей $i+1$ рассчитываются по тому же алгоритму при значениях времени $t-\Delta T$ и $t+\Delta T$, соответственно. При начале ссыпания материала с лотка, т.е. при выполнении условия $S_i(t) + T(t)/4 \geq L_L$, скорость движения центра тяжести считаем постоянной.

Можно для дискретных моментов времени $t = i \Delta t$ по зависимостям (5.32), (5.33), (5.44) определить численные значения $A(t)$, $T(t)$ и $S(t)$. Условие начала ссыпания материала с лотка имеет следующий вид:

$$S(k) + \frac{T(k)}{4} \geq L_L - S_0, \quad (5.46)$$

где L_L – длина лотка; S_0 – координата центра тяжести порции сыпучего материала после загрузки ее на лоток.

Если для порции с номером z ссыпание начнется по истечению времени TF с момента ее загрузки на лоток, то предыдущая порция с номером $z-1$ будет находиться в движении в течение времени $TF + \Delta T$. На рисунке 5.31 схематично показана ситуация к моменту начала ссыпания материала порции z с лотка, при этом часть материала порции $z-1$ к этому моменту времени будет еще оставаться на лотке.

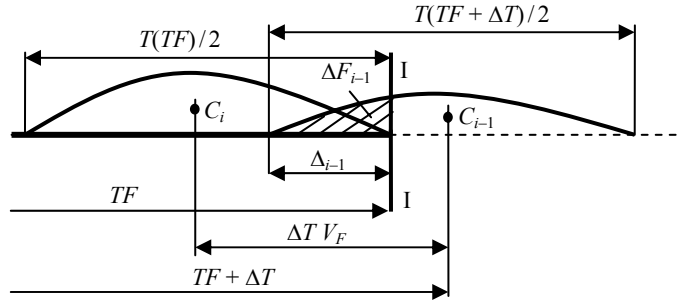


Рис. 5.31. Схема к расчету производительности вибрационного дозатора в момент времени t

Количественно эту часть материала можно определить, используя следующее выражение:

$$\Delta F_{z-1,0} = \left[A_{TF+\Delta T} - A_{TF+\Delta T} \cos \varphi_{z-1,0} \right] \frac{T_{TF+\Delta T}}{\pi}, \quad (5.47)$$

где $A_{TF+\Delta T}$ – амплитуда, рассчитанная по зависимости (5.32) в момент времени $t = TF + \Delta T$; F_0 – площадь продольного сечения порции после ее загрузки на лоток.

Численное значение $\varphi_{z-1,0}$ определяется следующим образом:

$$\varphi_{z-1,0} = \frac{\pi}{0,5 T_{TF+\Delta T}} \left[0,25 T_{TF+\Delta T} - \Delta T V_F + 0,25 T_{TF} \right], \quad (5.48)$$

где $T_{TF+\Delta T}$ – период, рассчитанный по зависимости (5.33) в момент времени $t = TF + \Delta T$; V_F – скорость центра тяжести порции сыпучего материала на момент начала ссыпания; T_{TF} – период, рассчитанный по зависимости (5.33) в момент времени $t = TF$.

Состояние системы по истечению интервала времени Δt схематично показано на рис. 5.32.

Центры тяжести порции z и $z-1$ переместятся на расстояние $S = V_F \Delta t$, соответственно изменятся амплитуда и полупериод. Часть материала порции z сыпется с лотка, а от порции $z-1$ на лотке еще останется часть материала, но меньше чем в предыдущем случае. Количество материала, сыпавшегося с лотка из порции z , можно определить, используя следующее выражение:

$$\Delta F_{z,1} = F_0 - \left[A_{TF+\Delta T} - A_{TF+\Delta T} \cos(\pi - \varphi_{z,1}) \right] \frac{T_{TF+\Delta T}}{\pi}, \quad (5.49)$$

где

$$\varphi_{z,1} = \frac{\pi}{0,5 T_{TF+\Delta T}} \left[\Delta t V_F + 0,25 T_{TF+\Delta T} - 0,25 T_{TF} \right]. \quad (5.50)$$

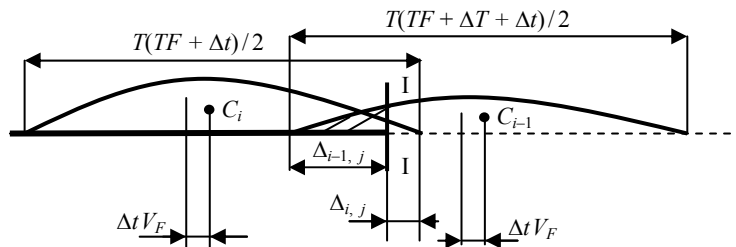


Рис. 5.32. Схема к расчету производительности вибрационного дозатора в момент времени $t + \Delta t$

Количество материала, сыпавшегося с лотка из порции $z-1$:

$$\Delta F_{z-1,1} = F_{z-1,0} - \left[A_{TF+\Delta T+\Delta t} - A_{TF+\Delta T+\Delta t} \cos(\varphi_{z-1,1}) \right] \frac{T_{TF+\Delta T+\Delta t}}{\pi}, \quad (5.51)$$

где

$$\varphi_{z-1,1} = \frac{\pi}{0,5 T_{TF+\Delta T+\Delta t}} \left[\frac{\varphi_{z-1,0}}{2\pi} T_{TF+\Delta t} - \Delta t V_F + 0,25 T_{TF+\Delta T+\Delta t} - 0,25 T_{TF+\Delta T} \right]. \quad (5.52)$$

Суммарное количество материала, сыпавшегося с лотка за время Δt (выраженное через площади), будет равно

$$\Delta F_1 = \Delta F_{z,1} + \Delta F_{z-1,1}. \quad (5.53)$$

Тогда весовая производительность дозатора определяется следующим выражением:

$$Q_1 = \frac{\Delta F_1}{\Delta t} b \rho, \quad (5.54)$$

где b – ширина лотка, м; ρ – насыпная плотность сыпучего материала, кг/м³.

Если с момента начала сыпания материала порции z дискретно изменять время как $j \Delta t$, то в общем виде можно записать следующие выражения для определения $\Delta F_{z,j}$, $\Delta F_{z-1,j}$ и Q_j :

$$\Delta F_{z,j} = F_{z,j-1} - \left[A_{TF+j\Delta t} - A_{TF+j\Delta t} \cos(\pi - \varphi_{z,j}) \right] \frac{T_{TF+j\Delta t}}{\pi}, \quad (5.55)$$

где

$$\varphi_{z,j} = \frac{\pi}{0,5 T_{TF+j\Delta t}} \left[j\Delta t V_F + 0,25 T_{TF+j\Delta t} - 0,25 T_{TF+\Delta t(j-1)} \right]; \quad (5.56)$$

$$\Delta F_{z-1,j} = F_{z-1,j-1} - \left[A_{TF+\Delta T+j\Delta t} - A_{TF+\Delta T+j\Delta t} \cos(\varphi_{z-1,j}) \right] \frac{T_{TF+\Delta T+j\Delta t}}{\pi}, \quad (5.57)$$

где

$$\varphi_{z-1,j} = \frac{\pi}{0,5 T_{TF+\Delta T+j\Delta t}} \left[\frac{\varphi_{z-1,j-1}}{2\pi} T_{TF+\Delta T+(j-1)\Delta t} + j\Delta t V_F + \right. \\ \left. + 0,25 T_{TF+\Delta T+j\Delta t} - 0,25 T_{TF+\Delta T+(j-1)\Delta t} \right]; \quad (5.58)$$

$$\Delta F_j = \Delta F_{z,j} + \Delta F_{z-1,j}; \quad (5.59)$$

$$Q_j = \frac{\Delta F_j}{\Delta t} b \rho. \quad (5.60)$$

Данные формулы (5.55) – (5.60) используются для расчета производительности до тех пор, пока $\varphi_{z-1,j} \leq 0$. После этого определяется производительность за интервал времени Δt .

Представленная выше методика расчета производительности может быть использована для расчета точности непрерывного дозирования. Если время, в течение которого отбирается одна проба, равно

$$\Delta T_S = \frac{\Delta T}{N} = K_S \Delta t, \text{ то вес каждой пробы будет равен:}$$

$$\Delta Q_{Sm} = \sum_{j=1}^{K_S} \Delta Q_j, \quad (5.61)$$

где ΔQ_j – вес материала, сыпавшегося с лотка на шаге j за интервал времени Δt .

Если для анализа необходимо N_S проб, то последовательно производится расчет для j от 1 до $N_S K_S$. В результате получаем значение ΔQ_{Sm} , где m изменяется от 1 до N_S .

Коэффициент вариации V_C будет определяться следующим образом:

$$V_C = \frac{100}{\Delta Q_N} \sqrt{\frac{1}{N_S - 1} \sum_{m=1}^{N_S} (\Delta Q_{Sm} - \Delta Q_N)^2}, \quad (5.62)$$

$$\Delta Q_N = Q_N \Delta t K_S,$$

где ΔQ_N – вес материала,сыпающегося с лотка за интервал времени Δt при заданной производительности, г; Q_N – заданная производительность, г/с.

Таким образом, рассмотренная математическая модель позволяет рассчитывать производительность дозатора и точность непрерывного дозирования при реализации технологии двухстадийного дозирования с использованием вибрирующего лотка.

5.4. ШНЕКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

При дозировании плохо сыпучих материалов чаще всего используют шнековые питатели.

На рисунке 5.33 показана схема экспериментальной установки [34]. Установка состоит из следующих основных узлов: бункера 1, основного 2 и дополнительного 3 шнеков, электродвигателей 4 и 5 привода дополнительного и основного шнеков, рамы 6 на упругих опорах, вибровозбудителя 7 и основания 8.

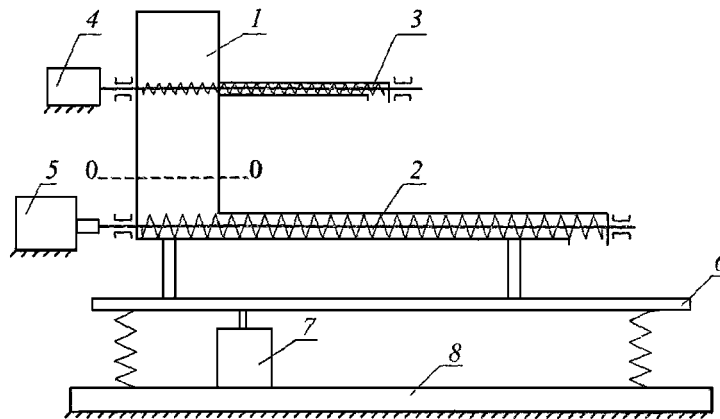


Рис. 5.33. Схема лабораторной установки

Производительность винтового питателя

$$Q = 0,785(D^2 - d^2)(t_{ш} - b)\phi k\omega/2\pi, \quad (5.63)$$

где D и d – диаметры, соответственно, наружных витков и вала винта, м; $t_{ш}$ – шаг винта, м; b – толщина витков, м; ϕ – коэффициент заполнения полостей винта (принимают $\phi = 0,3 \dots 0,8$ в зависимости от физико-механических свойств дозируемого материала и экспериментальных данных); k – коэффициент проскальзывания дозируемого материала в полостях винта (устанавливают экспериментально; обычно $k = 0,3 \dots 1$ в зависимости от свойств дозируемого материала и противодействия газовой среды у выходного штуцера; для предварительных расчетов можно принять $k = 1$); ω – угловая скорость винта, с^{-1} . Производительность шнекового дозатора изменяют, регулируя частоту вращения шнека.

Для сохранения однородности состава материала применяют шнеки с переменным шагом, убывающим в сторону разгрузки. В таких случаях размер куска должен быть меньше минимального шага винта.

Для уменьшения неравномерности выхода материала из шнека целесообразно перед выходным штуцером транспортирующий шнек выполнять без витков; длина этого участка составляет $1,5 \dots 2$ диаметра винта. Другой способ повышения точности подачи – использование многозаходных винтов.

В том случае, если есть опасность спрессовывания материала, используют шнеки с переменным шагом, увеличивающимся в направлении движения.

В шнековом вибрационном дозаторе полости между витками шнека, благодаря вибрациям корпуса, практически полностью заполняются материалом. Это обеспечивает достаточно высокую точность подачи материала. В вибровозбудителе возможно регулирование частоты колебаний, а также направления амплитуды колебаний.

Колебания направлены перпендикулярно к оси шнека, чтобы исключить влияние вибрации на производительность, особенно при небольших частотах вращения, колебания в направлении оси шнека вызывают существенные отклонения от заданной производительности, т.е. снижают точность дозирования.

Несмотря на то, что существуют различные способы стабилизации насыпной плотности сыпучего материала, заполняющего межвитковое пространство шнека, абсолютного постоянства этой плотности достичь не удастся. Как показали результаты предварительных экспериментов, отклонения производительности шнекового дозатора от заданной могут быть весьма существенными. При уменьшении времени отбора пробы до 5...10 с эти отклонения составляют 10 % и более.

Как уже отмечалось, наиболее перспективной, на наш взгляд, является двухстадийная технология дозирования. Применительно к шнековому дозатору она реализуется следующим образом. С помощью весового порционного дозатора в бункер 1 подаются порции весом P и объемом V через равные промежутки времени T . Производительность основного шнека 2 выбирается из следующего условия:

$$Q_{o,ш} + \Delta Q_{o,ш} = (V - \Delta V)/(T + \Delta T), \quad (5.64)$$

где $Q_{o,ш}$ и $\Delta Q_{o,ш}$ – соответственно, производительность основного шнека и максимальное отклонение его производительности, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; V и ΔV – соответственно, объем порции и максимальное отклонение, которое зависит от точности порционного дозатора, м^3 ; T и ΔT – соответственно, время между подачей отдельных порций в бункер и максимальное отклонение, с.

Предварительно в шнековый дозатор загружают некоторое количество сыпучего материала. Объем материала определяют из условия подачи очередной порции объемом $V - \Delta V$. Открытая поверхность сыпучего материала, находящегося в бункере, будет расположена на уровне нижнего края витков дополнительного шнека.

Рассмотрим два граничных режима работы дозатора.

1. Предположим, что основной шнек подает сыпучий материал с производительностью $Q_{o,ш} + \Delta Q_{o,ш}$, а порции имеют объем $V - \Delta V$. Тогда к моменту подачи очередной порции открытая поверхность сыпучего материала, находящегося в бункере, будет находиться на уровне $0 - 0$ (однократная предварительная загрузка материала).

2. Производительность основного шнека равна $Q_{o,ш} + \Delta Q_{o,ш}$, а объем порций $V + \Delta V$, и подаются эти порции в бункер через время $T - \Delta T$. В этом случае к моменту подачи очередной порции открытая поверхность материала, оставшегося в бункере, будет лежать выше уровня $0 - 0$, поскольку производительность основного шнека

$$Q_{o,ш} - \Delta Q_{o,ш} < (V + \Delta V)/(T - \Delta T).$$

После подачи очередной порции открытая поверхность материала будет располагаться выше уровня нижнего края витков дополнительного шнека, и естественно, этот избыток материала будет выгружаться из бункера дополнительным шнеком, производительность которого определяется из условия

$$Q_{д,ш} - \Delta Q_{д,ш} = \Delta V/(T - \Delta T). \quad (5.65)$$

Мы рассмотрели граничные режимы работы установки. В действительности, как показывают результаты предварительных экспериментов, производительность основного шнека периодически изменяется в диапазоне от $(Q_{o,ш} - \Delta Q_{o,ш})$ до $(Q_{o,ш} + \Delta Q_{o,ш})$. Результаты предварительных экспериментов дают основания предположить, что эти изменения происходят по синусоидальному закону, величина амплитуды и частоты отклонений, в основном, определяется свойствами сыпучего материала, а также геометрическими и режимными параметрами шнекового дозатора.

Отличительной особенностью шнековых питателей от трубчатых и вибрационных является отсутствие сглаживающей способности, т.е. их производительность практически не изменяется в зависимости от количества материала в загрузочной части шнека. Сглаживающий эффект всего питателя в целом обеспечивает дополнительный шнек. На рисунке 5.34 показана характерная кривая изменения во времени производительности шнекового питателя, показанного на рис. 5.33. Как видно из графиков, в зоне I непрерывный поток формируется шнеком 2, а в зоне II – шнеками 2 и 3. Ступенчатое изменение производительности отрицательно влияет как на точность дозирования, так и на равномерность непрерывного потока. Более того, как показали экспериментальные исследования, при такой реализации процесса точность непрерывного дозирования существенно ниже, чем точность порционного дозирования.

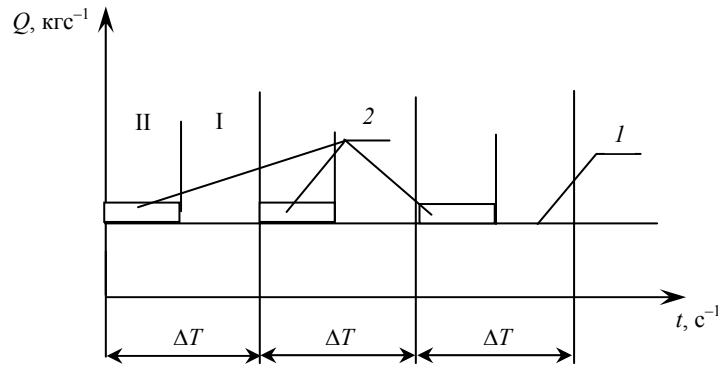


Рис. 5.34. Изменение производительности шнекового преобразователя:

- 1 – материал подается только основным шнеком 2;
- 2 – материал подается одновременно шнеками 2 и 3

Как видно (рис. 5.34), поток, формируемый шнеком 2, непрерывен во времени, а поток из шнека 3 имеет небольшие разрывы. Идеальный вариант непрерывного дозирования – отсутствие разрывов, однако это практически невозможно, поскольку производительности шнеков 2 и 3 имеют отклонения от средних значений. Важным фактом является то, что частицы отдельных порций (даже в реальных экспериментах) практически не перемешиваются между собой. Таким образом, если оценивать точность непрерывного дозирования за промежутки времени ΔT , то она равна точности порционного дозирования. Естественно, что при реальной оценке точности непрерывного дозирования время, за которое отбирается отдельная проба, может отличаться от ΔT . Кроме этого, нет синхронизации отбора проб с подачей порций в бункер питателя. Тем не менее, рассмотренный вариант реализации технологии двухстадийного дозирования позволяет наметить пути аппаратного оформления процесса и прогнозирования точности дозирования при различных сочетаниях геометрических и режимных параметров шнекового питателя.

5.4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШНЕКОВЫХ ПИТАТЕЛЕЙ

Для расчета производительности шнекового питателя необходимо определить объемную эффективность, которую обычно оценивают коэффициентом η_V [35].

На рисунке 5.35 показана схема перемещений элемента материала. Движение можно рассматривать как сложное, состоящее из переносного и относительного. Переносное движение совершается элементом совместно с точкой поверхности витка, в которой расположен рассматриваемый элемент материала. Относительное движение совершается в результате проскальзывания материала по поверхности витка. Это движение направлено под углом α к поперечному сечению шнека.

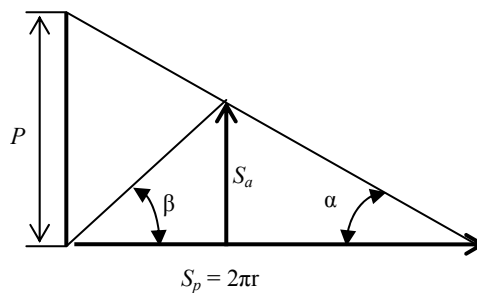


Рис. 5.35. Схема перемещения элемента материала в шнековом питателе

Абсолютное движение элемента материала направлено под углом $\alpha + \varphi$ к оси шнека. Перемещение элемента в переносном движении S_p за один оборот шнека равно:

$$S_p = 2\pi r = P / \operatorname{tg} \alpha. \quad (5.66)$$

Тогда осевое перемещение S_a можно определить следующим образом:

$$S_a = P \operatorname{tg} \beta / (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha). \quad (5.67)$$

Коэффициент объемной эффективности можно выразить через осевое перемещение и шаг витка:

$$\eta_V = S_a / P. \quad (5.68)$$

Подставив (5.67) в (5.68), получим:

$$\eta_V = \text{tg}\beta / (\text{tg}\beta - \text{tg}\alpha). \quad (5.69)$$

Учитывая, что $\text{tg}\alpha = P / 2\pi r$, а $\text{tg}\beta = (2\pi r - \mu_f P) / (2\pi \mu_f r + P)$, где μ_f – коэффициент трения материала по поверхности витка, получим:

$$\frac{\text{tg}\beta}{\text{tg}\beta + \text{tg}\alpha} = 1 - \frac{1 + 2\pi\mu_f \frac{r}{P}}{1 + 4\pi^2 \left(\frac{r}{P}\right)^2}. \quad (5.70)$$

С учетом полученной зависимости и изменений углов от радиуса значение коэффициента объемной эффективности можно определить следующим образом:

$$\eta_V = \frac{2}{R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2} \int_{R_{\text{in}}/P}^{R_{\text{out}}/P} \left[1 - \frac{1 + 2\pi\mu_f \frac{r}{P}}{1 + 4\pi^2 \left(\frac{r}{P}\right)^2} \right] r dr. \quad (5.71)$$

Введем следующие обозначения: $x = r / P$, тогда $dr = P dx$.

В данных обозначениях зависимость (5.71) принимает вид:

$$\begin{aligned} \eta_V &= \frac{2P^2}{R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2} \int_{R_{\text{in}}/P}^{R_{\text{out}}/P} \left[1 - \frac{1 + 2\pi\mu_f x}{1 + 4\pi^2 x^2} \right] x dx = \\ &= \frac{2P^2}{R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2} \left[\int_{R_{\text{in}}/P}^{R_{\text{out}}/P} x dx - \int_{R_{\text{in}}/P}^{R_{\text{out}}/P} \frac{x}{1 + 4\pi^2 x^2} dx - \int_{R_{\text{in}}/P}^{R_{\text{out}}/P} \frac{1 + 2\pi\mu_f x^2}{1 + 4\pi^2 x^2} dx \right]. \quad (5.72) \end{aligned}$$

В результате интегрирования получена следующая зависимость:

$$\begin{aligned} \eta_V &= 1 - \frac{P^2}{4\pi^2 (R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2)} \ln \frac{4\pi^2 R_{\text{out}}^2 + P^2}{4\pi^2 R_{\text{in}}^2 + P^2} - \frac{\mu_f P}{\pi (R_{\text{out}} + R_{\text{in}})} + \\ &+ \frac{\mu_f P^2}{2\pi^2 (R_{\text{out}}^2 - R_{\text{in}}^2)} \left[\text{ctg} \left(\frac{2\pi R_{\text{out}}}{P} \right) - \text{ctg} \left(\frac{2\pi R_{\text{in}}}{P} \right) \right]. \quad (5.73) \end{aligned}$$

Для упрощения процедуры определения объемной эффективности, из силового равновесия элемента материала на поверхности витка находим эквивалентное значение угла β_e . Эквивалентное значение угла α_e находим из условия: $\alpha_e + \beta_e + \varphi = \pi / 2$. Затем определяем η_V .

5.4.2. ОБЪЕМНАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СПИРАЛЬНЫХ ПИТАТЕЛЕЙ

При создании физической модели движения материала в спиральном питателе [35] были сделаны следующие допущения (рис. 5.36):

1. В периферийной зоне (зона I) сыпучий материал движется так же, как в шнековом питателе с размерами шнека R_{in} , R_{out} , P .

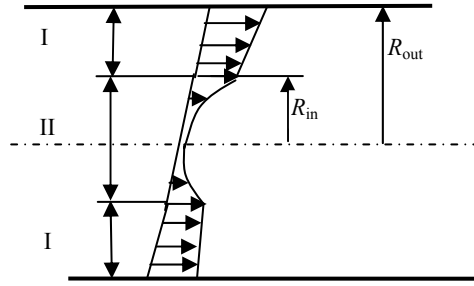


Рис. 5.36. Схема к расчету спирального питателя

2. В центральной зоне (зона II) с наружным радиусом R_{in} эпюры осевых перемещений и скоростей ограничены параболой с вершиной на оси вращения спирали.

3. На границе зон скорости осевого движения равны.

4. Угол между касательной к параболе и образующей цилиндра с радиусом R_{in} на границе зон равен углу трения движения дозируемого материала.

Исходя из сделанных допущений, коэффициент объемной эффективности спирального шнека будет складываться из двух составляющих. Для зоны I этот коэффициент можно рассчитать по зависимости (5.69) или (5.73). Для расчета коэффициента η_V зоны II необходимо построить эпюру осевых перемещений материала. В зоне I данную эпюру можно построить следующим образом. Для ряда значений r в диапазоне от R_{in} до R_{out} рассчитать коэффициент объемной эффективности по зависимости (5.69) и далее, учитывая, что $S_a/P = \eta_V$, построить эпюру относительных осевых перемещений материала в зоне I. Уравнение параболы, которая ограничивает эпюру осевых перемещений материала в центральной зоне, можно записать в следующем виде:

$$y = b + ax^2. \quad (5.74)$$

Первая производная на границе зон, т.е. при $X = R_{in}$, пропорциональна коэффициенту трения движения сыпучего материала (тангенсу угла трения), т.е.

$$y' = 2aR_{in} = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}, \quad (5.75)$$

тогда

$$a = \frac{1}{2R_{in} \operatorname{tg}\varphi}; \quad b + \frac{R_{in}^2}{2R_{in} \operatorname{tg}\varphi} = \frac{R_{in}}{\operatorname{tg}\varphi}.$$

Подставив данные выражения в уравнение (5.74), получим:

$$y = \frac{R_{in}}{2\operatorname{tg}\varphi} + \frac{r^2}{2R_{in} \operatorname{tg}\varphi}. \quad (5.76)$$

Среднеинтегральное значение коэффициента объемной эффективности для центральной зоны будет равно:

$$\eta_{V'}^{II} = \int_0^{R_{in}} \left[\eta_V(R_{in}) - \frac{R_{in}}{P \operatorname{tg}\varphi} + \frac{r^2}{2PR_{in} \operatorname{tg}\varphi} \right] \frac{2\pi r dr}{\int_0^{R_{in}} 2\pi r dr} = \eta_V(R_{in}) - \frac{7R_{in}}{8P \operatorname{tg}\varphi}. \quad (5.77)$$

На основе полученных зависимостей разработана компьютерная программа для расчета производительностей шнекового и спирального питателей. Сравнение результатов численных и натурных экспериментов, реализованных на лабораторных установках, показали хорошую сходимость. По результатам исследований разработана методика инженерного расчета шнековых и спиральных питателей.

5.5. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО СМЕШИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХСТАДИЙНОГО ДОЗИРОВАНИЯ

При непрерывном процессе смешивания для приготовления качественной смеси необходимо не только создать ячейку идеального смешения, но и особое внимание необходимо уделить качеству и способу дозирования компонентов смеси.

При двухстадийном дозировании производительность потока на выходе из дозатора периодически изменяется, причем период равен промежутку времени (ΔT) между подачей отдельных порций в устройства для их преобразования в непрерывный поток. На рисунке 5.37 показаны выходные сигналы с дозаторов компонентов A и B , производительности соответственно равны Q_A и Q_B .

Для получения требуемого соотношения концентраций компонентов на входе в смеситель, прежде всего необходимо синхронизировать данные функции.

Отклонение концентрации Δc можно определить, используя следующее соотношение

$$\Delta c(t) = \frac{\int_t^{t+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_t^{t+\Delta t} f_2(t) dt} \quad (5.78)$$

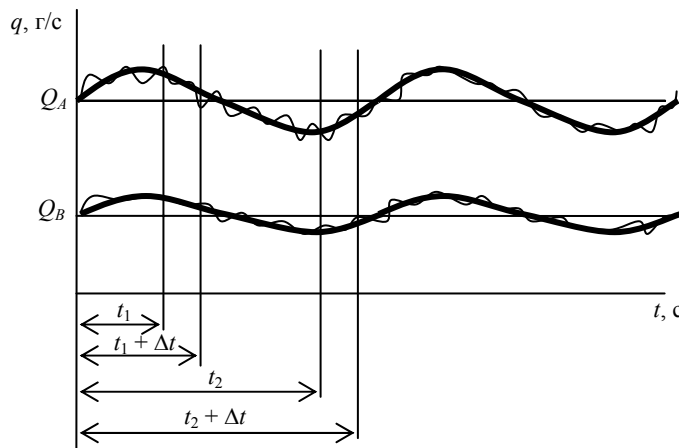


Рис. 5.37. Пропорциональное дозирование компонентов

Для получения идеальной смеси необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

1) для любых моментов времени t выполняется условие:

$$\frac{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_1}^{t_1+\Delta t} f_2(t) dt} = \frac{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_2}^{t_2+\Delta t} f_2(t) dt} = \dots = \frac{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_1(t) dt}{\int_{t_k}^{t_k+\Delta t} f_2(t) dt} = \frac{Q_A \pm \delta Q_A}{Q_B \pm \delta Q_B} = \text{const} \pm \xi; \quad (5.79)$$

2) осевые скорости компонентов A и B в смесителе одинаковы в любом поперечном сечении по длине этого смесителя, т.е.

$$V_A(L) = V_B(L) = V(L); \quad (5.80)$$

3) любой участок смесителя между поперечными сечениями с координатами L и $L+\Delta L$ является ячейкой идеального смешения.

Для реализации приведенных выше условий разработаны способ приготовления многокомпонентных смесей, в том числе из компонентов, склонных к сегрегации, и устройство для его реализации [36].

Способ заключается в том, что загрузку компонентов в бункер дозаторов осуществляют отдельными порциями через равные промежутки времени ΔT , последовательно, начиная с дозатора, расположенного ближе к загрузочному краю смесителя, причем интервалы между загрузками пропорциональны расстояниям между разгрузочными узлами дозаторов, каждая порция компонента имеет одинаковый вес, пропорциональный процентному содержанию компонента в готовой смеси, и для всех компонентов выполняется следующее равенство:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \Delta P_i}{\Delta T} = Q, \quad (5.81)$$

где N – количество компонентов; ΔP_i – вес отдельной порции i -го элемента; Q – производительность смесителя.

Затем осуществляется последовательная подача этих компонентов в виде непрерывных потоков в смеситель, в сечения, расположенные на расстояниях от загрузочного края смесителя, пропорциональных увеличению плотностей и/или уменьшению размеров частиц.

Способ реализован в установке, схема которой представлена на рис. 5.38.

Устройство содержит порционные дозаторы $1-3$ соответственно для компонентов A, B, C смеси. Для создания непрерывного потока сыпучего материала используются вибротроки $4-6$, расположенные вдоль ленточного транспортера 7 через определенные расстояния, имеющие поперечные перегородки 8 с возможностью фиксированного перемещения. Ленточный транспортер 7 находится на виброплите 9 , установленной через амортизаторы 11 на основании 14 . Для создания вибрации установлен вибратор 13 , который шарнирно закреплен с виброплитой и основанием. На ленточном транспортере также установлен датчик фиксации положения 12 перегородки 8 , который подает управляющий сигнал на блок управления 10 порционными дозаторами.

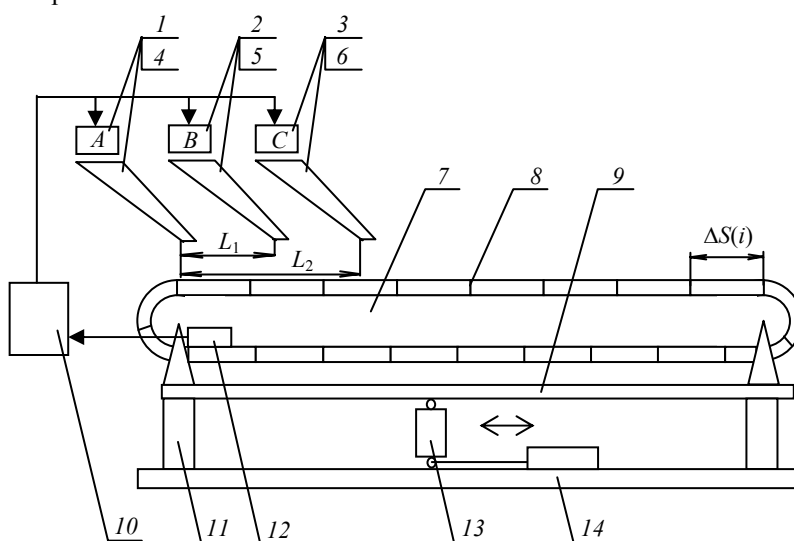


Рис. 5.38. Схема устройства для приготовления смеси сыпучих материалов

На основе данной схемы была создана лабораторная установка и проведен ряд экспериментов. Сущность экспериментов заключалась в следующем.

Формировались порции сыпучего материала соответственно компонентов A, B, C с весовыми соотношениями $0,5 : 0,3 : 0,2$, причем диаметры частиц компонентов $d_A > d_B > d_C$ (материалы *пшено, люцерна, речной песок*).

Задавалась производительность смесителя 100 г/мин.

Загрузку компонентов осуществляли отдельными порциями через равные промежутки времени ΔT , последовательно, начиная с дозатора, расположенного ближе к загрузочному краю смесителя, причем интервалы между загрузками пропорциональны расстояниям между разгрузочными узлами дозаторов, каждая порция компонента имеет одинаковый вес, пропорциональный процентному содержанию компонента в готовой смеси, и для всех компонентов выполняется следующее равенство:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \Delta P_i}{\Delta T} = Q, \quad (5.82)$$

где N – количество компонентов; ΔP_i – вес отдельной порции i -го элемента; Q – производительность смесителя.

Учитывая соотношение компонентов в смеси, вес порции по компоненту A составит $\Delta P_A = 25$ г, по компоненту B – $\Delta P_B = 15$ г и по компоненту C – $\Delta P_C = 10$ г. Согласно формуле (5.82), производительность смесителя равна:

$$Q = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta P_i}{\Delta T} = \frac{25+15+10}{30} = 0,033 \text{ г/с},$$

или 6 кг/ч, т.е. равняется заданной производительности.

Согласно предложенному способу, отдельные порции компонентов загружались последовательно, начиная с дозатора, ближнего к загрузочному краю смесителя, причем интервалы между загрузками пропорциональны расстояниям между дозаторами. Разгрузочный узел дозатора для компонента *A* совпадал с началом верхнего горизонтального участка ленточного транспортера, как это показано на рис. 4.1. Если расстояние между разгрузочными узлами дозаторов *A* и *B* равно L_1 , а скорость ленточного транспортера V , то интервал времени между загрузками порций *A* и *B* будет равен

$$\Delta\tau_{AB} = L_1 / V. \quad (5.83)$$

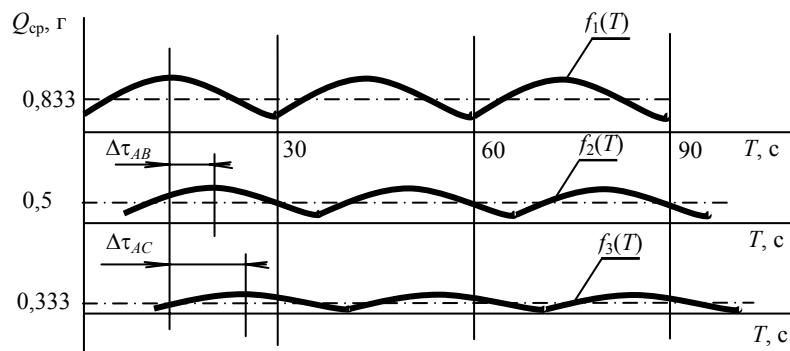
Аналогично, если расстояние между разгрузочными узлами дозаторов *A* и *C* равно L_2 , то интервал времени между загрузками порций *A* и *C* будет равен

$$\Delta\tau_{AC} = L_2 / V. \quad (5.84)$$

Расстояния L_1, L_2 должны быть пропорциональны размерам частиц компонентов, т.е.

$$L_1 / L_2 = K d_B / d_C, \quad (5.85)$$

где K – коэффициент, определяемый экспериментально (для большинства компонентов $K = 1$).



а)

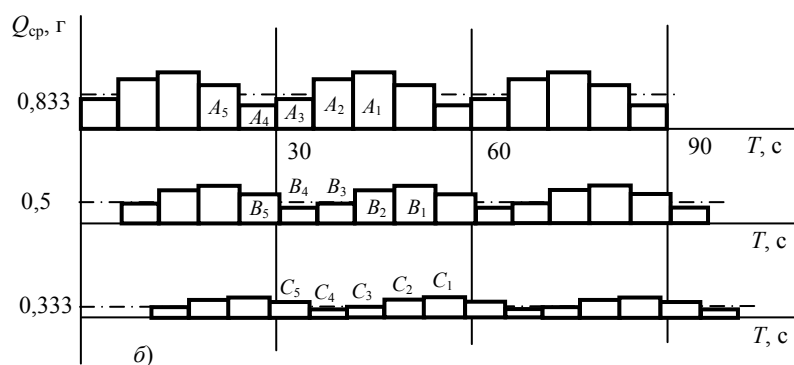


Рис. 5.39. Изменения производительностей дозаторов компонентов А, В, С в зависимости от времени

При преобразовании отдельных порций в непрерывный поток на вибрирующем лотке производительность изменялась по зависимости близкой к синусоидальной (рис. 5.39, а). На рисунке 5.39, б представлены те же графики в виде гистограмм за промежутки времени $\Delta\tau = \Delta T / M$ (в данном эксперименте $M = 5$).

Рассмотрим процесс образования смеси, согласно предлагаемому способу, в одной ячейке на ленте транспортера при выполнении условия:

$$\Delta S / V = \Delta\tau. \quad (5.86)$$

Объем A_1 (рис. 5.40) попал в ячейку 1 на ленте транспортера, поскольку, согласно предлагаемому способу, промежуток времени между подачами порций компонента A и B составляет $\Delta\tau_{AB} = L_1/V$, то ячейка 1 переместится под ссыпаящий край дозатора B в тот момент, когда будет ссыпаться объем B_1 , соотношение этих объемов, а следовательно и соотношение их весов соответствует содержанию компонентов A и B в готовой смеси. Когда ячейка 1 переместится под разгрузочный узел дозатора компонента C , с него в эту ячейку попадет объем C_1 . Поскольку с учетом смещения разгрузочных узлов вдоль ленты транспортера и определенных промежутков между подачей отдельных порций компонентов в разные ячейки транспортера попадали разные объемы компонентов, то соотношение весов будет всегда постоянно равным заданному соотношению компонентов в готовой смеси. Для рассматриваемого варианта приготовления трехкомпонентной смеси математически это можно представить следующим равенством

$$\int_0^{\Delta\tau} f_1(T)dT \Big/ \int_{\Delta\tau_{AB}}^{\Delta\tau+\Delta\tau_{AB}} f_2(T)dT \Big/ \int_{\Delta\tau_{AC}}^{\Delta\tau+\Delta\tau_{AC}} f_3(T)dT = 0,5/0,3/0,2. \quad (5.87)$$

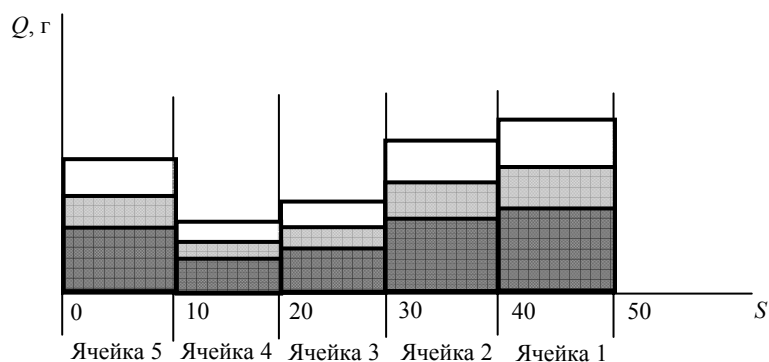


Рис. 5.40. Соотношение компонентов в ячейках при $\Delta S = \text{const}$

Так как ленточный транспортер установлен на вибрирующей плите, то в каждой ячейке на транспортной ленте будет происходить смешивание компонентов. Длина ленточного транспортера, амплитуда и частота вибрации выбирались так, чтобы к моменту ссыпания материала из ячеек транспортера процесс смешивания был завершён, т.е. чтобы смесь имела требуемое качество.

Для интенсификации процесса смешения вибратор соединен с плитой и основанием с помощью шаровых шарниров и установлен на основании с возможностью фиксированного перемещения в горизонтальной плоскости. Это позволяет за счет изменения положения вибратора 13 (рис. 5.38) относительно основания изменять угол между направлением вибрации и вертикалью, при этом изменяется характер движения частиц на ленте транспортера и, следовательно, характер процесса смешивания.

В частности, на рис. 5.41, *а* показано движение частиц в одном циркуляционном контуре, а на рис. 5.41, *б* – в двух циркуляционных контурах. Наличие одного или двух циркуляционных контуров определяется углом между направлением вибрации и вертикалью.

На практике часто требуется приготовить смеси одинаковых объемов, готовую смесь упаковать или передать на дальнейшую переработку в виде отдельных порций одинакового веса, например при производстве таблеток или брикетов. Для данного случая был проведен ряд экспериментов на базе установки (рис. 5.38), для которых перегородки на ленточном транспортере устанавливались с возможностью фиксированного перемещения вдоль ленты транспортера. Для определения положения ячеек использовался датчик 12 (рис. 5.38), который подавал управляющий сигнал на блок управления порционными дозаторами. В этом случае ширина ячеек ΔS разная и пропорциональна изменению производительности на ссыпаящих краях дозаторов (рис. 5.42).

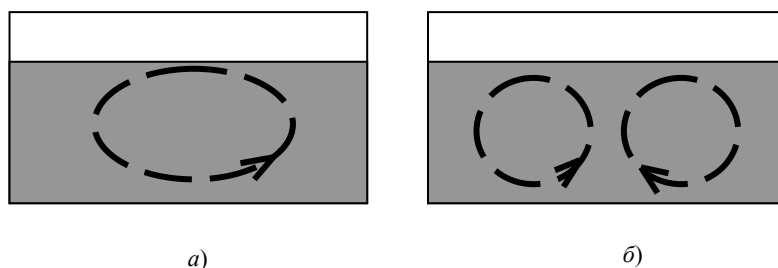


Рис. 5.41. Движение частиц в ячейке смесителя

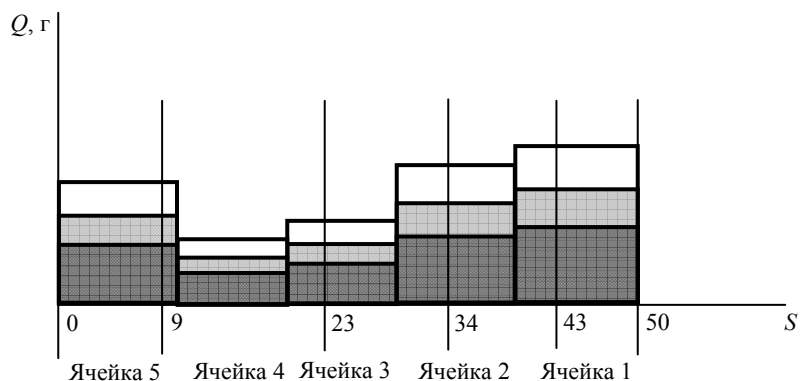


Рис. 5.42. Соотношение компонентов в ячейках
(ΔS пропорциональна изменению производительности дозаторов)

Математически это можно представить следующим образом. При выполнении равенства (5.87) для компонента A будет выполняться равенство (5.88) (аналогично для компонентов B и C):

$$\int_0^V f_1(T) dT = \int_0^V f_1(T) dT = \dots = \int_0^V f_1(T) dT. \quad (5.88)$$

Возможность фиксированного перемещения перегородок относительно ленты транспортера позволяет оперативно изменять вес отдельной порции смеси, без изменения режима работы смесителя в целом. Синхронизация попадания определенных объемов в определенные ячейки обеспечивается наличием датчика фиксации положения ячейки, который связан с узлом управления порционными дозаторами. Сигнал на подачу первой порции в дозатор компонента A подается в тот момент, когда пустая ячейка определенной ширины находится на определенном расстоянии от разгрузочного узла этого дозатора. Далее процесс дозирования осуществляется, как описано выше.

5.6. СПОСОБ НЕПРЕРЫВНОГО ДОЗИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

При реализации описанного выше способа непрерывного смешения требуется глубокая модернизация технологического оборудования. Для снижения издержек нами был разработан способ непрерывного дозирования и устройство для его осуществления, позволяющие повысить качество готовой смеси за счет модернизации только дозатора, при использовании типового смесителя [37].

Способ заключается в том, что формируются отдельные порции равного веса ΔP или равного объема ΔV , подачу которых осуществляют через равные промежутки времени ΔT в устройство для преобразования порций в непрерывный поток в результате перемещения материала от загрузочного узла к разгрузочному. Преобразование отдельных порций в непрерывный поток осуществляется на лотке, наклоненном к горизонту под углом, меньшим чем угол трения покоя сыпучего материала о поверхность лотка, а перемещение материала осуществляют за счет колебаний лотка с амплитудой, линейно уменьшающейся от загрузочного узла к разгрузочному, причем направление колебаний лотка составляет с вертикалью угол от нуля до угла наклона лотка к горизонту по направлению от загрузочного узла к разгрузочному.

Способ реализован в установке, схема которой представлена на рис. 5.43.

Устройство содержит основание 1 , на котором шарнирно закреплен лоток 2 . Загрузочная часть лотка шарнирно закреплена с основанием через вибратор 3 . Отдельные порции через равные промежутки времени формируются и подаются в лоток 2 порционным дозатором 4 . В верхней части лотка 2 установлена поперечная перегородка, которая состоит из верхней части 5 и нижней 6 . Перегородка установлена с возможностью фиксированного перемещения вдоль лотка 2 . Части перегородки 5 и 6 имеют возможность независимого фиксированного перемещения относительно друг друга. Вибратор 3 установлен на основании 1 с возможностью перемещения вдоль оси лотка 2 с помощью механизма 7 . Включение и выключение механизма 7 осуществляется узлом 8 , причем операции синхронизированы узлом 9 с работой порционного дозатора 4 . Загрузка лотка 2 осуществляется через узел 10 , а выгрузка через узел 11 . Соединение пластины 12 , на которой шарнирно закреплен вибратор 3 , с основанием 1 выполнено таким образом, чтобы при перемещении вдоль лотка 2 угол наклона лотка к горизонту не изменялся.

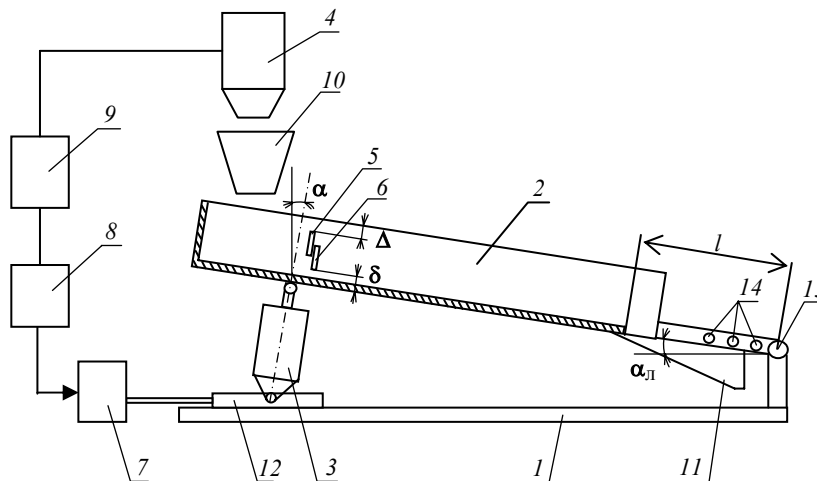


Рис. 5.43. Схема устройства для непрерывного дозирования сыпучих материалов

На основе данной схемы была создана лабораторная установка и проведен ряд экспериментов. Сущность экспериментов заключается в следующем.

Отдельные порции сыпучего материала равного веса ΔP или равного объема ΔV через равные промежутки времени ΔT подаются в верхнюю часть лотка, которая отгорожена от основного лотка подвижной перегородкой (поз. 5, 6). Численные значения ΔP и ΔT выбираются таким образом, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$Q_3 = \Delta P / \Delta T, \quad (5.89)$$

где Q_3 – заданная или требуемая производительность дозатора, г/с; ΔP – вес отдельной порции, г; ΔT – время, через которое отдельные порции подаются в лоток, с.

Положение перегородки и ее верхней части 5 выбирается таким, чтобы объем отгораживаемой части лотка был равен объему одной порции. При попадании материала в верхнюю часть лотка после загрузки первой порции показан на рис. 5.44 заштрихованной областью.

Поскольку угол наклона лотка меньше коэффициента трения покоя сыпучего материала о поверхность лотка при неподвижном лотке, движение материала не происходит. При включении вибратора 3 происходит истечение сыпучего материала через щелевую прорезь между днищем лотка и пластиной 6 с дальнейшим движением частиц материала вдоль лотка и ссыпанием через узел 11. Интенсивность (ускорение и скорость) движения частиц при фиксированном угле наклона лотка к горизонту зависит от амплитуды и частоты колебаний, соотношения амплитуд колебаний на загрузочном и разгрузочном краях лотка, а также от направления колебаний, которое определяется положением вибратора 3 на основании 1 и конкретно углом α .

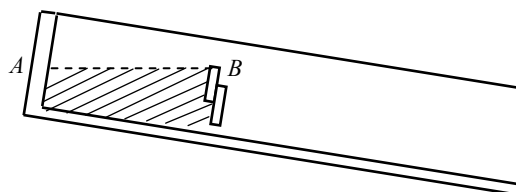


Рис. 5.44. Распределение материала в загрузочном бункере лотка

Величина щелевого зазора δ определяется экспериментально из выполнения следующего соотношения:

$$(q_{щ} + \Delta q_{щ}) \Delta T = \Delta P, \quad (5.90)$$

где $q_{щ}$ – средняя производительность щелевого зазора, т.е. количество материала, вытекающего через щелевой зазор при вибрации лотка, г/с; $\Delta q_{щ}$ – максимальное отклонение производительности от ее среднего значения, г/с.

Результаты экспериментального исследования показали, что даже для хорошо сыпучего материала (монодисперсный сухой речной песок) максимальное отклонение $\Delta q_{щ}$ составляет не менее 1 %.

Для плохо сыпучих материалов погрешность может достигать 10 %. Выполнение равенства (5.90) гарантирует истечение материала через щелевой зазор в течение всего промежутка времени ΔT . Если на промежутке времени ΔT производительность щелевого зазора имела отклонение в минус, т.е. была равна $q_{щ} - \Delta q_{щ}$, то к моменту подачи очередной порции некоторое количество сыпучего материала будет находиться в отгороженной части лотка, после подачи очередной порции поверхность материала будет находиться выше линии

AB (рис. 5.44). Этот материал будет пересыпаться через верхнюю часть перегородки 5 и подаваться на вибрирующий лоток. Таким образом, правильный выбор величины зазора δ позволит компенсировать отклонения в производительности по щелевому зазору. Результаты экспериментов также показали, что если амплитуды колебаний загрузочного и разгрузочного краев лотка равны, то наблюдается ускоренное движение частиц по лотку, материал при этом разрыхляется (расстояние между частицами увеличивается), что отрицательно сказывается на равномерности непрерывного дозирования. Если амплитуда колебаний линейно уменьшается от загрузочного к разгрузочному краю, то соответственно уменьшается ускорение движения частиц. При этом наблюдается уплотнение слоя и повышается равномерность непрерывного потока, ссыпающегося с лотка, т.е. повышается точность дозирования.

На характер движения материала по лотку, в основном, влияют два параметра: угол наклона лотка к горизонту; соотношение амплитуд колебаний на загрузочном и разгрузочном краях. Для управления этими параметрами в устройстве предусмотрена возможность изменения расстояния от ссыпающегося края лотка до шарнира 13 (*l*) за счет отверстий 14, а также возможность изменения направления колебаний за счет перемещения пластины 12, на которой крепится вибратор. Выбор диапазона возможного изменения угла вибрации α (рис. 5.43) обусловлен тем, что при α , равном углу наклона лотка к горизонту, направление колебаний, перпендикулярное к поверхности лотка, и сила вибрации не дают проекцию на направление движения частиц, а только уменьшают силу нормального давления частиц на поверхность и, следовательно, силу трения. Использование угла $\alpha < 0$ нецелесообразно, поскольку возникают нежелательные силы воздействия на шарнир, а на частицы начинает действовать ярко выраженная сила от вибрации.

При дозировании плохо сыпучего материала, а также материалов, форма частиц которых существенно отличается от шарообразной, наблюдалось образование пробок в щелевом зазоре. Чаще всего это происходило, когда в загрузочной части лотка находилось достаточно много материала, т.е. после загрузки очередной порции. Естественно, это отрицательно сказывается на точности непрерывного дозирования. Для устранения этого эффекта в течение времени ΔT после подачи очередной порции направление вибрации плавно изменялось от $\alpha = 0$ до $\alpha = \alpha_n$ (рис. 5.43).

Проведенный ряд экспериментов показал, что плавное изменение угла наклона вибрации связано с определенной сложностью в управлении узлом перемещения 7 вибратора 3 относительно основания (рис. 5.43). Для упрощения конструкции направление вибрации в промежутке времени ΔT менялось не плавно, а ступенчато. В течение времени $\Delta t \leq 0,1\Delta T$ угол между направлением колебаний и вертикалью равен углу наклона лотка к горизонту, причем ступенчатые изменения колебаний осуществляют до момента подачи очередной порции.

Таким образом, непосредственно после подачи очередной порции угол $\alpha < \alpha_n$ и указанные циркуляционные контуры существуют, исключая образование пробок. Перед подачей очередной порции за время Δt механизм 7 перемещает пластину 12 влево до момента, когда угол α будет равен α_n . К этому моменту времени в загрузочной части лотка останется не более 10 % от общего объема порции и пробок при этом, как показали результаты экспериментов, практически не образуется.

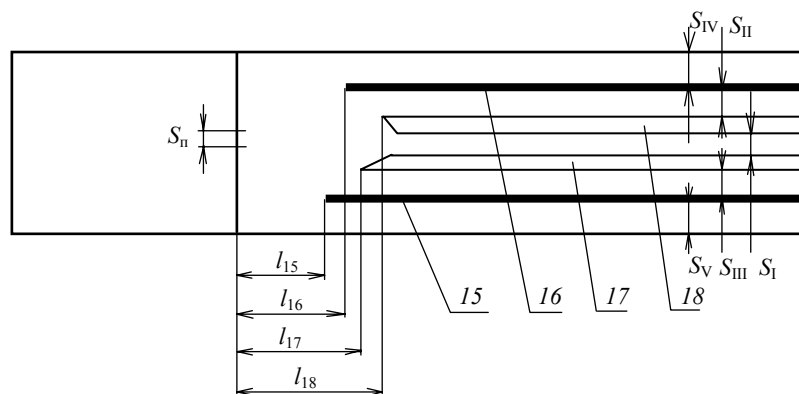
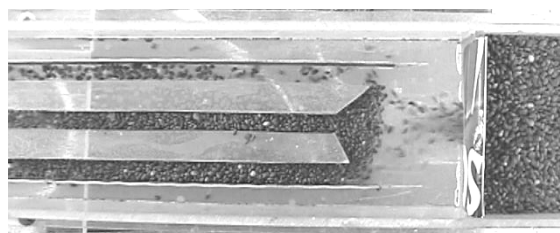


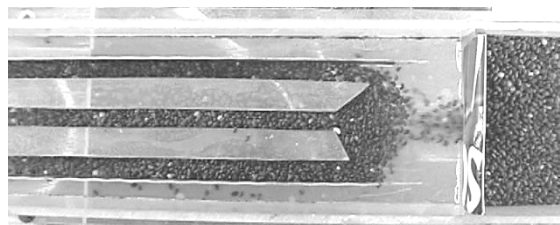
Рис. 5.45. Многоканальный лоток

Как отмечалось ранее, скорость движения сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку уменьшается от загрузочного к разгрузочному краю. Частицы, движущиеся впереди, сдерживают задние и, наоборот, вышележащие подталкивают нижележащие. Таким образом, создаются условия для стабилизации насыпной плотности сыпучего материала. Разделение лотка на несколько ручьев позволило создать потоки практически толщиной в одну частицу.

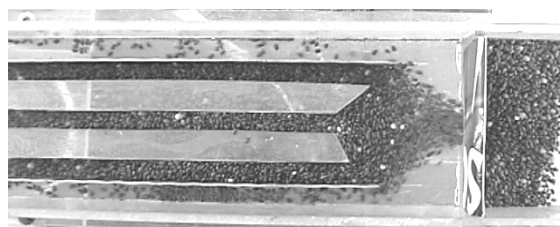
Идея такого разделения заключается в том, при своем выходе из загрузочного бункера через П-образную прорезь сыпучий материал попадает как бы в аккумуляционную зону, чему способствуют расположенные на разном расстоянии перегородки 15, 16, 17 и 18 (рис. 5.45). При установившемся режиме работы материал дозируется по трем каналам (рис. 5.46, а). В случае увеличения производительности по П-образной прорези происходит переполнение аккумуляционной зоны и начинается движение по четырем каналам (рис. 5.46, б). Однако после сброса излишек материала вновь начинают работать три канала (рис. 5.46, в).



a)



б)



в)

Рис. 5.46. Движение материала по каналам

Наличие П-образной прорези в нижней подвижной части перегородки с регулируемой высотой позволяет в широком диапазоне изменять количество материала, высыпавшегося из загрузочной части лотка (верхняя часть лотка, отгороженная перегородкой) в единицу времени. Наличие подвижных пластин, установленных вдоль оси лотка, позволяет компенсировать возможные отклонения по производительности при истечении материала через П-образную прорезь, т.е. повысить равномерность потока и, следовательно, точность дозирования.

5.7. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОЗИРОВОЧНО-СМЕСИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов непрерывного дозирования и смешения под воздействием вибрации позволили разработать следующие рекомендации по выбору диапазонов возможных изменений основных режимных и конструктивных параметров:

1. Для обеспечения безотрывного движения сыпучего материала по наклонному лотку, который совершает колебания в направлении перпендикулярном к его поверхности, частота колебаний и амплитуда в зоне загрузки отдельной порции сыпучего материала должны определяться из следующего равенства:

$$\omega^2 A_{0L} = g \cos \alpha, \quad (5.91)$$

где α – угол наклона лотка к горизонту.

При больших значениях $\omega^2 A_{0L}$ начинается движение частиц с отрывом от лотка, что отрицательно влияет на точность дозирования. Меньшие значения $\omega^2 A_{0L}$ снижают интенсивность процесса преобразования отдельной порции в непрерывный поток. Это было экспериментально подтверждено. В частности, при использованной нами частоте колебаний $\omega = 100 \text{ с}^{-1}$ амплитуда была порядка $A_{0L} = 1 \text{ мм}$.

2. Угол наклона лотка к горизонту выбирается из следующего условия:

$$\alpha = (0,3...0,5)\alpha_{\text{тр.дв}}, \quad (5.92)$$

где $\alpha_{\text{тр.дв}}$ – угол трения движения.

При значениях $\alpha < 0,3\alpha_{\text{тр.дв}}$ порция материала слишком медленно перемещается от загрузочного к разгрузочному краю, а при $\alpha > 0,5\alpha_{\text{тр.дв}}$ наблюдаются неконтролируемые обрушения конгломератов частиц, что отрицательно влияет на точность непрерывного дозирования.

3. Рабочая длина лотка выбирается из следующего неравенства:

$$3\frac{T_0}{2} \leq L_L \leq (1 - K_p)L_C, \quad (5.93)$$

где $T_0/2$ – полупериод синусоиды, описывающей открытую поверхность порции сыпучего материала; K_p – параметр математической модели, определяющий минимальное значение амплитуды колебаний, при котором сыпучий материал начинает движение вдоль лотка; L_C – расстояние от загрузочного края лотка до шарнира.

Экспериментально установлено, что при значениях $L_C \leq 3T_0/2$ даже при малых углах наклона лотка к горизонту не происходит уменьшение амплитуды данной полуволны, необходимой для создания равномерного непрерывного потока материала при ссыпании с лотка. При значениях $L_L > (1 - K_p)L_C$ амплитуда на ссыпающем краю будет недостаточной для движения частиц, будет наблюдаться накопление сыпучего материала на разгрузочном краю, поскольку $mg \sin \alpha + mK_p \omega^2 A_0 < mg \cos \alpha$, и, следовательно, на ссыпающем краю лотка частицы не будут двигаться вдоль лотка.

4. Начальная ширина лотков выбирается из условия равенства полупериодов синусоид, ограничивающих порцию сыпучих материалов после подачи их в лоток, и определяется по следующей зависимости:

$$b_i = \frac{b_1 C_1 \operatorname{tg} \varphi_i}{C_i \operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (5.94)$$

где b_1 – ширина лотка дозатора ключевого компонента; C_1 – концентрация ключевого компонента в готовой смеси; φ_1 – угол трения движения ключевого компонента; C_i и φ_i – соответственно концентрация и угол трения движения i -го компонента.

В качестве ключевого компонента выбирается компонент, имеющий меньшую концентрацию в готовой смеси.

Предлагается следующая стратегия расчета и оптимизации основных режимных и геометрических параметров смесительной вибрационной установки. С учетом рекомендаций (п. 1 – 3) выбираются амплитуда колебаний лотка A_{0L1} , частота колебаний ω_1 , угол наклона лотка к горизонту α_1 , длины L_{L1} и L_{C1} вибрационного преобразователя для ключевого компонента. Режимные параметры ΔP_1 и ΔT_1 выбираются из условия:

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta T_1} = QC_1, \quad (5.95)$$

где Q – заданная массовая производительность смесителя по готовой смеси.

Ширина лотка по ключевому компоненту b_1 выбирается исходя из неравенства

$$b_1 \geq 20d_1, \quad (5.96)$$

где d_1 – диаметр частиц ключевого компонента.

Данное условие обеспечивает свободное движение частиц материала по лотку при незначительном влиянии пристенных эффектов.

С использованием вибрационного короба (рис. 5.16) по результатам экспериментов определяли параметры зависимости (5.34). Далее по результатам экспериментальных исследований движения порции сыпучего материала по наклонному вибрирующему лотку при фиксированном угле наклона его к горизонту определяли параметры математической модели. И далее методом последовательных приближений, варьируя параметрами ΔP_1 , ΔT_1 и α_1 , определяли такое сочетание данных параметров, при котором коэффициент вариации непрерывного потока на выходе из дозатора минимален.

Для остальных компонентов смеси проводились аналогичные исследования и расчеты при условии, что ширина лотка выбирается с учетом п. 4 рекомендаций. Варьируемые параметры изменяются таким образом, чтобы интервал времени между началом ссыпания порции с лотка и завершением ссыпания для всех компонентов был одинаковым. Если по i -у компоненту указанный интервал меньше, чем по ключевому компоненту, то необходимо либо увеличить полупериод в момент загрузки порции i -го компонента за счет уменьшения ширины лотка b_i , либо увеличить время пребывания порции i -го компонента на вибрирующем лотке за счет уменьшения угла наклона лотка к горизонту.

После выполнения указанных условий рассчитываются оптимальные размеры смесительной ячейки и времени смешения. Общий алгоритм определения и оптимизации основных режимных и конструктивных параметров представлен на рис. 5.47.

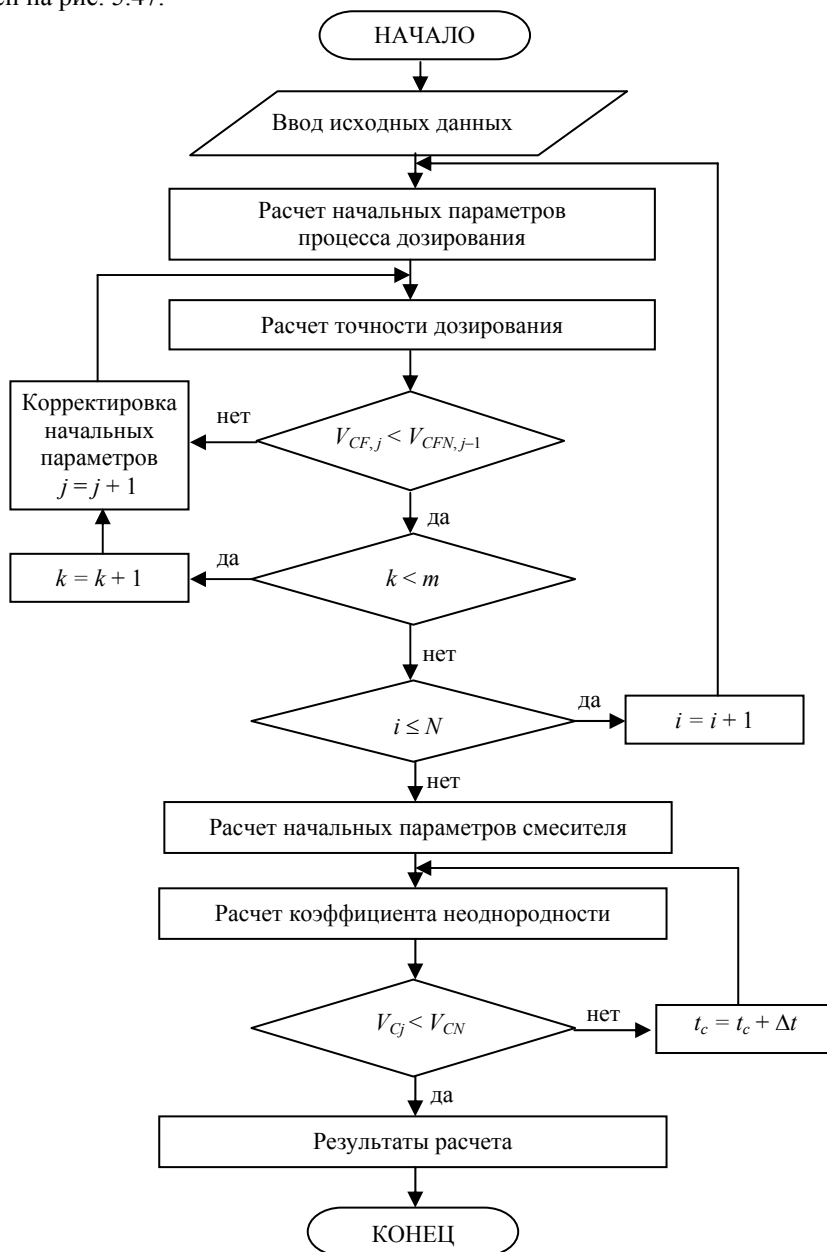


Рис. 5.47. Алгоритм расчета конструктивных и режимных параметров вибрационно-смесительной установки

Необходимые исходные данные для расчета:

1. Q_N – производительность смесителя, г/с;
2. C_1, C_2, \dots, C_N – требуемые концентрации в смеси, %;
3. $\alpha_{тр. дв i}$ – угол трения движения сыпучего материала i -го компонента, рад;
4. ρ_i – насыпная плотность i -го компонента, г/м³;
5. d_i – диаметр частиц i -го компонента, м;
6. K_{P_i} – коэффициент пропорциональности i -го компонента;
7. $P_{0i,j}$ – вероятность перехода i -го компонента в ячейку, содержащую только компонент j ;
8. β_i – коэффициент затухания i -го компонента;

9. $\langle V_0 \rangle$ – средняя начальная скорость движения центра тяжести порции сыпучего материала i -го компонента, м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2138783 Российская Федерация, С1, МКИ⁶ G 01 F 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 98110906/28; заявл. 02.06.98; опубл. 27.09.99, Бюл. № 27.
2. Пат. 2251083 Российская Федерация, С2, МКИ G 01 F 11/00. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, Д.К. Калягин, А.А. Осипов; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003109774/28; заявл. 07.04.03; опубл. 27.04.05, Бюл. № 12.
3. Першин, В.Ф. Моделирование процесса преобразования отдельных порций сыпучего материала в непрерывный поток / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, А.Г. Ткачев // Динамика процессов и аппаратов химической технологии : тез. докл. IV Всерос. науч. конф. – Ярославль, 1994. – Т. 1. – С. 68.
4. Дозатор ДВА-1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://my.elvisti.com/tkm/oborud/d01_a1.html, свободный.
5. Весовой дозатор MicroBatch MB2, Gain-in-weight batching. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brabender-technologic.com//mainpage/english/products/batch/micbatch.htm>, свободный.
6. Дозатор весовой автоматический ДВП-3 со шнеком. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://avein.ru/catalog/prd4.php>, свободный.
7. Першин, В.Ф. Экспериментальные исследования динамики процесса дозирования сыпучих материалов в трубчатом питателе / В.Ф. Першин, С.В. Барышникова, Е.В. Маликова // Динамика процессов и аппаратов химической технологии : тез. докл. IV Всерос. науч. конф. – Ярославль, 1994. – Т. 1. – С. 229.
8. Barishnikova, S. The application of two-state technology for feeding particulate solids / S. Barishnikova, V. Pershin, A. Tkachev // Summaries of 12-th International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praha, Czech Republic, 1996. – V. 6. – P. 73.
9. Конструирование и расчет машин химических производств : учеб. для вузов / Ю.И. Гусев [и др.]; под ред. Э.Э. Кольман-Иванова. – М. : Машиностроение, 1985. – 408 с.
10. Репкин, Ю.А. Трубчатые устройства для подачи и дозирования сыпучих материалов / Ю.А. Репкин // Разработка, исследование оборудования для получения гранулированных материалов : сб. тр. – М. : МИХМ, 1985. – С. 52–57.
11. Движение сыпучего материала на вибрирующей пластине / Б.А. Барк, С.В. Барышникова, Д.К. Каляпин, В.Ф. Першин // IV науч. конф. : краткие тезисы докл. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 1999. – С. 121–122.
12. Барышникова, С.В. Модернизация шнекового питателя для непрерывного дозирования сыпучих материалов / С.В. Барышникова, Д.В. Филимонов // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 17–20.
13. Гусев, Ю.И. Гранулирование мелкодисперсных материалов в грануляторе барабанного типа : дис. ... канд. техн. наук / Ю.И. Гусев. – М., 1967. – 135 с.
14. Першин, В.Ф. Методы расчета и новые конструкции машин барабанного типа для переработки сыпучих материалов : дис. ... д-ра техн. наук / В.Ф. Першин. – М., 1994. – 428 с.
15. Трофимов, А.В. Исследование движения сыпучих материалов во вращающихся барабанах без внутренних устройств : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Трофимов. – М., 1973. – 140 с.
16. Рассказов, Н.И. Движение сыпучего материала во вращающейся трубе распределителя порций / Н.И. Рассказов, Ю.А. Репкин, В.Ф. Удальцов // Химическое машиностроение. – М., 1978. – Вып. 9. – С. 145–161.
17. Першин, В.Ф. Энергетический метод описания движения сыпучего материала в поперечном сечении гладкого вращающегося цилиндра / В.Ф. Першин // Теоретические основы химической технологии. – 1988. – Т. XXII. – № 2. – С. 255–260.
18. Першин, В.Ф. Расчет распределения сыпучего материала в гладком вращающемся барабане / В.Ф. Першин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 6. – С. 8–9.
19. Першин, В.Ф. Расчет параметров движения сыпучих материалов во вращающихся гладких барабанах / В.Ф. Першин // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1986. – № 12. – С. 15–16.
20. Першин, В.Ф. Использование энергетического подхода при определении режимов движения сыпучего материала во вращающемся барабане / В.Ф. Першин, Г.А. Минаев // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. XXIII. – № 5. – С. 659–662.
21. Вишняков, Г.В. К расчету расходных характеристик трубчатого питателя / Г.В. Вишняков, Ю.А. Репкин // Разработка, исследование и расчет машин и аппаратов химических производств. – М., 1984. – С. 85–94.
22. Осецкий, В.М. Движение материала во вращающейся трубе с горизонтальной и наклонной осью / В.М. Осецкий // Сб. научных трудов МГУ, 1939. – Вып. 4. – С. 295–311.

23. Осецкий, В.М. Движение сыпучего материала во вращающемся барабане при малых угловых скоростях / В.М. Осецкий // Сб. научных трудов МГУ, 1937. – Вып. 3. – С. 245 – 274.
24. Das Gupta, S. Axial transport of granular solids in horizontal rotating cylinders. Part 1: Theory / S. Das Gupta, D.V. Khakhar, S.K. Bhatia // Powder Technology, 67. – 1991. – P. 145 – 151.
25. Rao, S.J. Axial transport of granular solids in rotating cylinders Part 2: Experiments in a non-flow system / S.J. Rao, S.K. Bhatia, D.V. Khakhar // Powder Technology, 67. – 1991. – P. 155 – 162.
26. Квасова, А.Г. Движение фронта сыпучего материала во вращающемся трубчатом дозаторе / А.Г. Квасова, Ю.И. Гусев // Разработка, исследование оборудования для получения гранулированных материалов. – М., 1985. – С. 58 – 62.
27. Барышникова, С.В. Разработка новых конструкций и методов расчета устройств для непрерывного дозирования сыпучих материалов : дис. ... канд. техн. наук / С.В. Барышникова. – Тамбов, 1999. – 171 с.
28. Vibrofeeding of bulk solids: theory and experiment / S. Barishnikova, V. Pershin, D. Kalypin, S. Egorov // Summaries of 12-th International Congress of Chemical and Process Engineering. – Praha, Czech Republic, 1996. – Vol. 6. – P. 45.
29. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дороховов. – М. : Наука, 1976. – 500 с.
30. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов. – М., 1985. – 440 с.
31. Осипов, А.А. Разработка, исследование и расчет вибрационной установки для приготовления многокомпонентных смесей : дис. ... канд. техн. наук / А.А. Осипов. – Тамбов, 2004. – 211 с.
32. Каляпин, Д.К. Совершенствование технологии двухстадийного дозирования сыпучих материалов / Д.К. Каляпин, А.А. Осипов, С.В. Барышникова // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. – Вып. 13. – С. 46 – 49.
33. Осипов, А.А. Математическое описание движения сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке / А.А. Осипов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 45 – 49.
34. Филимонов, Д.В. Использование двухстадийной технологии для дозирования плохосыпучих материалов / Д.В. Филимонов, С.В. Барышникова // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2001. – Вып. 8. – С. 73 – 77.
35. Филимонов, Д.В. Расчет производительности шнековых и спиральных питателей / Д.В. Филимонов, С.В. Першина // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 64 – 68.
36. Пат. 2242273 Российская Федерация, С1, МКИ⁷ В 01 F 3/18. Способ приготовления многокомпонентных смесей и устройство для его реализации / Першин В.Ф., Барышникова С.В., Калягин Д.К., Осипов А.А. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2003113033/15 ; заявл. 05.05.03 ; опубл. 20.12.04, Бюл. № 35.

ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

6.1. ДОЗАТОРЫ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ

Весовые дозаторы серийно выпускают многие отечественные и зарубежные компании. Одним из ведущих российских производителей и разработчиков весоизмерительной техники для промышленности является компания "Тензо-М" [1]. Компания ежегодно производит многие десятки тысяч весоизмерительных датчиков, весов, дозаторов и вторичных приборов для многих отраслей промышленности. Все типы выпускаемой весоизмерительной техники сертифицированы органами РосТехРегулирования и внесены в Государственный Реестр средств измерений.

На рисунке 6.1 показан дозатор сыпучих материалов непрерывного действия Альфа ДЛТ [2].

Автоматический контроль и регулирование (стабилизация) массового расхода монодисперсных, хорошо сыпучих материалов с размером частиц до 10 мм при выпуске из емкостей на поточные технологические линии. Дозаторы применяются в перерабатывающей, пищевой, химической и других отраслях при производстве муки, комбикормов, спирта, пива, минеральных удобрений, строительных смесей.



Рис. 6.1. Дозаторы сыпучих материалов непрерывного действия Альфа ДЛТ

Дозаторы легко встраиваются в АСУ и выполняют следующие функции: измерение и стабилизацию массового расхода материала; отображение текущего и заданного расходов; суммирование и отображение пропущенной массы материала; автоматическое отмеривание заданной дозы пропущенного материала; блокировку выпуска материала по внешним сигналам.

Основные характеристики дозаторов представлены в табл. 6.1.

Базовый комплект включает в себя: измерительно-дозировующее устройство с лотковым чувствительным элементом и заслоночным регулирующим органом в одном корпусе; шкаф автоматики с вторичным весовым преобразователем и самонастраивающимся ПИД-контроллером, аналоговые входы/выходы и интерфейс RS-485 с протоколом Modbus RTU для связи с АСУТП; комплект соединительных кабелей; паспорт, руководство по эксплуатации; свидетельство о калибровке.

6.1. Основные характеристики дозаторов Альфа ДЛТ

Технические характеристики	Модельный ряд дозаторов Альфа модификации ДЛТ							
	ДЛТ16				ДЛТ100			
	4-2	6,3-2	10-1	16-1	25-2	40-2	63-2	100-2
Наибольший предел дозирования при насыпной массе 0,8 т/м ³ , т/ч	4,0	6,3	10,0	16,1	25	40	63	100
Наименьший предел дозирования, т/ч	0,4	0,63	1,0	1,6	2,5	4,0	6,3	10
Предел относительной погрешности, %	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Диапазон рабочих температур, °С	-20...+40							
Степень защиты по ГОСТ 14254, не ниже	IP-65							

Вид привода регулирующей заслонки	Электрический	
Напряжение питания	220 В / 50 Гц / до 50 ВА	
Габаритные размеры, мм: – измерительно-дозировочного устройства; – шкафа автоматики	472 × 335 × 574 300 × 220 × 400	530 × 650 × 800 300 × 220 × 400
Масса, не более, кг: – измерительно-дозировочного устройства; – шкафа автоматики	30 6	100 6



Рис. 6.2. Расходомеры сыпучих материалов серии "Лотос"

Расходомеры сыпучих материалов серии "Лотос" [3] (рис. 6.2) используются для автоматического непрерывного контроля массового расхода зернистых, порошкообразных и пылевидных сыпучих материалов в свободно текущем потоке. Основные отрасли применения – цементная, химическая, перерабатывающая, строительная. Применяется для автоматической дозированной загрузки транспортных средств, для непрерывного смесеприготовления, в системах регулирования соотношения потоков и т.п. Основными достоинствами данного оборудования являются: нечувствительность к налипанию материала на измерительную систему; возможность измерения расхода материалов с повышенной абразивностью и нагретых до 150 °С; легкая установка в технологические коммуникации; удобное обслуживание, не требующее высокой квалификации.

Базовая комплектация включает в себя: первичный преобразователь массового расхода с тензометрическим лотковым чувствительным элементом; шкаф контроля и сигнализации с вторичным преобразователем – весовым контроллером ТВ-006С (ПП6.02) и элементами сигнализации.

Основные характеристики расходомеров серии "Лотос" представлены в табл. 6.2.

6.2. Основные характеристики расходомеров серии "Лотос"

Технические характеристики	Лотос-25	Лотос-75	Лотос-150	Лотос-250
Наибольший предел измерения, т/ч	25	75	150	250
Наименьший предел измерения, т/ч	5	15	30	50
Предел относительной погрешности, %	2,0			

Диапазон рабочих температур, °С	-20...+40			
Степень защиты по ГОСТ 14254, не ниже	IP-65			
Напряжение питания	220 В / 50 Гц / до 15 ВА			
Габаритные размеры, мм:				700 × 700
– первичного преобразователя;	375 × 340	700 × 600	700 × 700	× × × 130
– шкафа автоматики	× × 500	× × 800	× × 1000	0
	300 × 220	300 × 220	300 × 220	300 × 220
	× × 400	× × 400	× × 400	× × 400
Масса, не более, кг:				
– первичного преобразователя;	20	60	110	150
– шкафа автоматики	6	6	6	6



Рис. 6.3. Весы бункерные электронные "Поток"

Весы бункерные электронные "Поток" [4] (см. рис. 6.3) служат для статического автоматического взвешивания сыпучих продуктов, поступающих непрерывным потоком с производительностью до 70 т/ч при учетных и технологических операциях.

Основные характеристики бункерных весов представлены в табл. 6.3.

Стандартная комплектация включает в себя: загрузочное устройство с пневмоприводом; несущую раму с защитными крышками; весовой бункер с выпускными створками; тензодатчики из упрочняемой нержавеющей стали, герметизированные лазерной сваркой (степень защиты IP-68) и заполненные инертным газом; шкаф управления; весовой преобразователь ТВ-009 или ТВ-011 (RS-232/485); паспорт; руководство по эксплуатации; свидетельство о первичной проверке органа ГМС РФ; гарантийные обязательства 18 месяцев.

Технологическое многокомпонентное дозирование плохо сыпучих продуктов в весовой бункер, таких как витаминные добавки и т.п., при изготовлении комбикормов и в других производствах можно осуществлять с помощью дозаторов серии "Гамма" [5, 6].

Дозаторы работают под управлением АСУ на базе промышленного контроллера или под управлением от компьютера со специальным программным обеспечением. Набор компонентов в весовой бункер производится последовательно, шнековыми питателями в режиме грубо/точно (используется преобразователь частоты). В системе управления дозатором можно создавать базу рецептов, корректировать существующие рецепты, задавать количество циклов дозирования, вести учет по компонентам, рецептам и т.д. Основные характеристики приведены в табл. 6.4.

6.3. Основные характеристики бункерных весов

Модель	Производительность, т/ч	Габаритные размеры, мм	Тип продукта
Поток 30 (АВД)	5... 15	924 × 924 × 750	Зерно, гранулы и порошки полимеров, соли, крупа, комбикорм, мука, крахмал и другие сыпучие продукты
Поток 60 (АВБ)	10... 30	924 × 924 × 1010	
Поток 100 (АВБ)	15... 40	924 × 924 × 1160	
Поток 150 (АВБ)	20... 60	924 × 924 × 1560	
Поток 300 (АВБ)	25... 70	924 × 924 × 1760	

6.4. Основные характеристики дозаторов "Гамма"

Технические характеристики	Значения
Класс точности по ГОСТ 10223–97	0,5
Наибольший предел дозирования (НПД), кг	Зависит от модификации дозатора
Наименьший предел дозирования (НмПД), кг	Зависит от модификации дозатора
Питание электрическое	380 В / 220 В / 50 Гц / 2 кВА
Питание сжатым воздухом, МПа	0,5...0,8
Производительность, мешков/ч	до 30
Диапазон рабочих температур:	
– без осушки воздуха;	0...+40 °С
– с осушкой воздуха	-30...+40 °С

Стандартная комплектация включает в себя: весовой бункер на раме, шнековые питатели; шкаф управления с пускорегулирующей аппаратурой; шкаф силовой; шкаф пневматики; весовой преобразователь-контроллер ТВ-006 (RS-232/485); паспорт, руководство по эксплуатации; свидетельство о первичной поверке органами ГМС РФ.



Рис. 6.4. Дозатор "Гамма"

Компания выпускает также тензодатчики [7, 8] балочного типа из нержавеющей стали (рис. 6.5, 6.6), которые применяются в платформенных весах и бункерных весах. Основные характеристики датчиков представлены в табл. 6.5.

Научно-производственная и инжиниринговая фирма ООО "КОНСИТ-А" основана в 1991 г. как производитель оборудования для рассева, смешивания, сушки, транспортирования и измельчения различных материалов и в настоящее время входит в число известных в России разработчиков и изготовителей

современного конкурентоспособного технологического оборудования для различных отраслей промышленности. Фирма поставляет это оборудование, а также комплексы и установки на их базе предприятиям пищевой, молочной, фармацевтической, химической, строительной (для производства сухих строительных смесей), горнодобывающей, металлургической и многих других отраслей промышленности России и ближнего зарубежья.

Дозатор весовой ДВ-500 [9] предназначен для накопления, дозирования и подачи сыпучих, зернистых и порошкообразных материалов, не склонных к налипанию, с размером частиц от 0,05 до 3 мм. Дозатор состоит из рамы, винтового питателя и тензоопор. На трубе питателя имеется приемная емкость, закрываемая крышкой с патрубками. Питатель опирается на раму через три тензодатчика.



Рис. 6.5. Тензодатчик балочного типа



Рис. 6.6. Тензорезисторный датчик Н

6.5. Технические характеристики датчиков

Параметры датчика	Значения параметров	
Наибольший предел измерения (НПИ), кг	20, 50, 100, 200	
Класс точности по ГОСТ 30129 (МОЗМ Р60)	C1	C3
Число поверочных интервалов	1000	3000
Минимальный поверочный интервал	НПИ/5000	НПИ/10 000
Рабочий коэффициент передачи (РКП), мВ/В	$2 \pm 0,005$	$2 \pm 0,002$
Начальный коэффициент передачи (НКП), % от РКП	< 3	< 3
Комбинированная погрешность, % от РКП	$\leq \pm 0,040$	$\leq \pm 0,020$
Ползучесть (30 мин), % от РКП	$\leq \pm 0,049$	$\leq \pm 0,025$
Изменение НКП от температуры, % от РКП/°C	$\leq \pm 0,0028$	$\leq \pm 0,0014$
Изменение РКП от температуры, % от РКП/°C	$\leq \pm 0,0022$	$\leq \pm 0,0011$
Наибольшее напряжение питания постоянного тока, В	12	
Сопротивление входное, Ом	390 ± 15	
Сопротивление выходное, Ом	350 ± 1	
Сопротивление изоляции, ГОм	≥ 5	
Диапазон термокомпенсации, °C	-10... +40	
Рабочий диапазон температур, °C	-30... +50	
Диапазон температур хранения, °C	-40... +50	
Степень защиты по ГОСТ 14254	IP-68	
Допустимая перегрузка в течение не более 1 ч, % от НПИ	25	
Разрушающая нагрузка, % от НПИ	300	
Материал датчика	Нержавеющая сталь	

Места загрузки и выгрузки защищены от пыления резиновыми герметизаторами. Принцип действия дозатора основан на преобразовании тензометрическими датчиками величины перемещения под действием веса в электрический сигнал пропорционально нагрузке, измерении этого сигнала и сравнении его величины с заданной для каждого компонента смеси. Материалы из бункеров загружаются в дозатор винтовыми питателями поочередно. Дозатор весовой изготавливается в двух вариантах: дозатор ДВ-500-К-268 – в опорном варианте, а дозатор ДВ-500-К-268-01 – в подвесном варианте.

Основные характеристики дозаторов даны в табл. 6.6.

6.6. Основные характеристики дозаторов ДВ-500

Параметры дозаторов	К-268-00.000	К-268-00.000-01
	Геометрическая вместимость бункера, м ³	0,5
Время опорожнения бункера, мин	1	
Точность дозирования, %	1	
Диапазон дозирования, кг	40...480	
Диаметр винта, м	0,25	
Привод	$N = 4$ кВт; $n = 1500$ об/мин; $i_{ред} = 25$	
Материал дозатора	Сталь углеродистая	
Габаритные размеры ($L \times B \times H$), мм	182 × 1196 × 2566	152 × 1149 × 2340
Масса, кг	798	571

Дозатор добавок предназначен для весового дозирования добавок при производстве сухих смесей крупностью частиц не более 1,3 мм, насыпной плотностью от 0,5 до 9 г/см³ и относительной влажностью не более 4 % при температуре окружающей среды от 274 до 314 К (от 1 до 40 °С) [10]. Наполнение приемного бункера может осуществляться одновременно четырьмя винтовыми питателями одним компонентом или поочередно каждым питателем различными компонентами. Дозатор добавок входит в состав оборудования модульных установок и заводов по производству сухих строительных смесей. Может применяться в пищевой, химической и других отраслях промышленности

Основные технические характеристики представлены в табл. 6.7.

ООО "ТензоПрибор" [11] имеет опыт проектирования, производства и внедрения автоматизированных технологических линий дозирования сыпучих и жидких материалов для предприятий углеобогащения и коксохимии, производства ферросплавов и огнеупорных материалов для металлургии, строительных материалов.

Автоматизированные технологические линии дозирования эксплуатируются на ОАО "Нижнетагильский металлургический комбинат", АО "Аксуский ферросплавный завод", Братском и Красноярском алюминиевых заводах, Беловской ЦОФ, ОАО "Уралкалий" и др.

Ленточные весовые дозаторы ДВЛ [12] используются для непрерывного динамического взвешивания и дозирования сыпучих материалов в технологических потоках металлургической промышленности, а также на предприятиях цементной, горнорудной, угольной, строительных материалов и других отраслей промышленности. Дозатор является комплектным оборудованием в системах управления технологическими процессами, но может иметь и самостоятельное автономное применение. Дозатор ДВЛ – система, состоящая из весового конвейера, электропривода, микроконтроллера, функционирующая на основе принципа непрерывного взвешивания и дозирования (рис. 6.7).

Сигналы весовых нагрузок на ленту и скорости ее движения обрабатываются системой измерения, управления и регулирования. Постоянное сравнение фактической производительности с заданной регулируется скоростью движения конвейерной ленты, что обеспечивает поддержание требуемого расхода материала. Основные характеристики дозаторов ДВЛ приведены в табл. 6.8.

6.7. Основные характеристики дозатора добавок

Наименование	Значение
Наибольший предел дозирования, кг	30
Наименьший предел дозирования, кг	3
Предел допускаемой погрешности дозирования, %	±1

Вместимость бункеров-питателей, м ³	4 × 0,09
Привод шнека – мотор-редуктор МРЧ-40М-45-56Шп-1-2-У3-С-380	
Мощность, кВт	4 × 0,3
Частота вращения выходного вала, об/мин	47,6
Передаточное число редуктора	31,5
Диаметр шнеков, мм	75
Производительность одного шнека, м ³ /ч	0,54
Вместимость приемного бункера, м ³	0,03
Привод затвора дискового разгрузки приемного бункера – пневматический	
Номинальное рабочее давление, мПа (кГс/см ²)	0,63 (6,3) ± 0,1
Материал дозатора – сталь углеродистая	
Грузовоспринимающее устройство – тензорезисторный датчик силы типа "SBA-50L"	
Номинальная нагрузка, кг	0...50
Категория точности по ГОСТ 28836–92	0,02
Напряжение питания постоянного тока, В	10
Габаритные размеры (L × B × H), мм	1405 × 1405 × 1830
Масса, кг	250

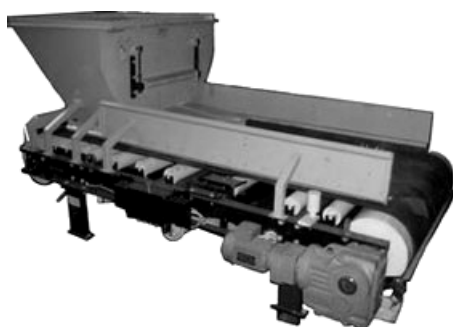


Рис. 6.7. Ленточный весовой дозатор ДВЛ

6.8. Основные характеристики дозаторов ДВЛ

Модель	Характеристики	Комплект поставки
ДВЛ-5Н	Регулируемая производительность, от 2,5 до 400 т/ч	<i>Стандартное исполнение:</i> – конвейер весовой ленточный; – шкаф управления; – пост местного управления; – устройство формирования слоя материала.
ДВЛ-4Н	Погрешность дозирования материалов по ГОСТ 30124	
ДВЛ-6,3Н	Диапазон регулирования скорости	
ДВЛ-10Н	Производительности 1:10	<i>Дополнительная комплектация:</i> – питатель (роторный, шнековый, вибрационный); – кожух аспирационный; – комплект соединительных кабелей
ДВЛ-16Н	Ширина конвейерной ленты от 500 до 1600 мм	
ДВЛ-25Н	Межосевое расстояние от 2000 до 9000 мм	

Компания "Сигнал-Пак" [13] выпускает линейный весовой дозатор В1 (рис. 6.8), предназначенный для автоматического дозирования легкосыпучих и мелкоштучных продуктов: крупа, орехи, сухарики, макароны, чипсы, пельмени, печенье, замороженные овощи и т.п.

Дозатор [14] состоит из размещенных на каркасе бункера-накопителя и от одного до четырех весодозирующих ручьев. Каждый ручей включает в себя: два каскада виброротков с промежуточным накопителем между ними, две заслонки и весоизмерительную систему с корзиной на тензодатчике. Управление всеми параметрами дозирования осуществляется программируемым контроллером. Для их отображения используется ЖК дисплей. В памяти контроллера можно сохранить до 30 программ дозирования со своими параметрами, что сводит к минимуму время простоя при переходе с одного вида продукта на другой. С помощью оптических датчиков поддерживается необходимый уровень продукта на лотках.



Рис. 6.8. Линейный весовой дозатор В1

Специалисты предприятия "РОСАТ" проводят полный цикл работ от предпроектного обследования объекта и разработки технического задания до изготовления, шеф-монтажа и запуска оборудования на месте эксплуатации [15]. Дозаторы непрерывного действия ДНД [16] выпускаются на несколько диапазонов номинального расхода и предназначены для непрерывной подачи сыпучего продукта с заданной скоростью. Дозирование осуществляется за счет поддержания заданной скорости вращения шнека с помощью частотного преобразователя.

Точность весового дозирования достигается периодическим измерением реального расхода с помощью тензометрической системы. В случае расхождения реального расхода с заданным происходит корректировка параметров задания скорости вращения шнека. Система является самонастраивающейся, поэтому даже при неверном задании параметров регулирования скорости шнека программа путем последовательных приближений скорректирует их до необходимой точности за несколько периодов измерения реального расхода.

Все данные о дозировании накапливаются в энергонезависимой памяти контроллера, обеспечивая тем самым самоконтроль работы дозатора. Для обеспечения непрерывности дозирования в течение длительного времени установлен специальный алгоритм управления заполнением бункера-накопителя в процессе работы.

Кроме высокой точности дозирования, отличительной особенностью дозатора является возможность быстрой его калибровки и поверки без дополнительных приспособлений и оборудования по прилагаемой методике.

Дозаторы серии ДНД имеют принципиальное отличие от широко применяемых ленточных (конвейерных) дозаторов и конвейерных весов, заключающееся в том, что расход продукта определяется на основе измерения веса реально отдозированного продукта. Конвейерные весы и ленточные дозаторы определяют расход продукта путем математических вычислений на основании показаний давления ленты на датчики силы и скорости ленты конвейера. Стыки ленты и изменения ее натяжения оказывают воздействие на датчики силы, которое воспринимается как изменение количества продукта, лежащего на ленте. Это снижает достоверность данных. Конвейерные весы и ленточные дозаторы требуют частой калибровки, методика которой достаточно сложна. Кроме того, конвейерные весы требуют наличия прямолинейных участков конвейера (от 3 до 12 м) до и после весов, удаления от мест перегибов, сложных систем натяжения ленты. В дозаторах серии ДНД исключены посторонние влияния, а калибровка и периодическая поверка кардинально упрощены и сводятся к калибровке (поверке) весоизмерительной системы методом прямого нагружения. При этом межповерочный интервал значительно больше, чем у конвейерных весов и ленточных дозаторов. Аппаратура и программа управления позволяют проводить текущий самоконтроль работы дозатора путем определения реального расхода двумя независимыми методами: расчетным по установленному значению производительности и по фактическим данным контроллера.

Основное направление деятельности компании ООО ТАУ2 – проектирование и внедрение систем автоматизации технологических процессов, весового и дозирующего оборудования, датчиков технологического контроля при строительстве и реконструкции элеваторов, мукомольных и комбикормовых заводов [17].

Компания производит бункерные тензометрические весы в потоке и дозаторы сыпучих и жидких продуктов (зерно, мука, комбикорм, масло и др.), надежно работающие в условиях вибрации и воздействий

аспирации (элеваторы, мукомольные и комбикормовые заводы). Дозаторы оснащаются пневматическими задвижками (шиберами) или шнековыми питателями. Для дистанционного управления в системах учета сырья и готовой продукции весовые контроллеры объединяются в локальную сеть. Дистанционное управление обеспечивает задание параметров работы, пуск, перевод в паузу и остановку весового контроллера. Система учета обеспечивает формирование отчетов о почасовой, сменной, суточной, месячной выработке.



Рис. 6.9. Дозатор ДВТ-МС

Для систем многокомпонентного дозирования выпускается модель дозатора ДВТ-МС (рис. 6.9), обеспечивающая дозирование до 8 компонентов смеси общим весом до 300 кг. При работе в составе системы автоматизированного управления дозаторы ДВТ-МС обеспечивают работу узлов предварительного и основного смешивания комбикормового производства. Программное обеспечение системы учета многокомпонентного дозирования собирает и хранит в стандартной базе данных информацию о заданиях, фактических отвесах и режимах дозирования каждого компонента.

Для увеличения точности дозирования установки снабжены одним или двумя дозирующими шнеками с частотными приводами, управляющимися от весового контроллера, и отсечными пневмозадвижками. Весовой контроллер обеспечивает плавное регулирование грубой и точной подачи продукта, что обеспечивает высокую производительность и точность дозирования.

Основные характеристики семейства дозаторов ДВТ представлены в табл. 6.9.

В дозаторах используются электропневматические затворы подачи и выгрузки взвешиваемого продукта с использованием оборудования CAMOZZI PNEUMATIC, Италия. Блок подготовки воздуха и регулятор давления позволяют использовать пневматические магистрали с широким диапазоном значений параметров качества воздуха, в необходимых случаях дозаторы комплектуются подающими шнеками.

Для снижения влияния аспирации в станине дозатора имеются воздушные каналы, соединяющие надвесовое и подвесовое пространства, и клапаны, выравнивающие давление воздуха.

6.9. Основные характеристики дозаторов ДВТ

Наименование модели	Бункер, л (НПВ, НмПВ), кг	Производительность, т/ч	Габаритные размеры
ДВТ ТАУ 200	170 (120, 12)	36	995 × 900 × 1190
ДВТ ТАУ 100	100 (70, 7)	24	885 × 800 × 1190
ДВТ ТАУ 100-50	50 (50, 5)	12	937 × 740 × 980
ДВТ ТАУ-МС 300	300 (300, 70)	36	1625 × 1625 × 2550
ДВТ ТАУ 100-50ВШ	100 (50, 20)	10	890 × 1950 × 3970
ДВТ ТАУ 100ВП	100 (50, 20)	10	700 × 2000 × 2600

Весовой контроллер дозатора предоставляет потребителю ряд дополнительных функций: обнаружение возмущений, снижающих точность взвешивания и дозирования (вибрация, удары, изменения давления аспирации); управление загрузкой и выгрузкой с помощью дискретных и аналоговых сигналов; дистанционное управление дозатором с помощью сетевого интерфейса, панели управления и дискретных и аналоговых каналов ввода-вывода; сигнализация об аварийных состояниях узлов дозатора и автоматическое требование проведения регламентных работ после выработки ресурса заменяемых деталей; протоколирование заданий, отвесов, изменений параметров, аварийных ситуаций; сетевой интерфейс для работы в составе системы учета продукции; русскоязычный интерфейс оператора.

ЗАО "Агрэскорт" – один из ведущих российских производителей прецизионных весовых ленточных дозаторов и весов непрерывного действия, а также другого дозирующего оборудования. Наличие высококвалифицированного персонала, собственных производственных площадей и испытательных стендов позволяет реализовать полный комплекс работ по созданию дозирующих систем от разработки до пуска в эксплуатацию [18].

Ленточный весовой дозатор непрерывного действия типа 4488 ДН-У [19], выпускаемый компанией, предназначен для автоматизации непрерывных и циклических процессов дозирования (в том числе для затаривающих устройств), а также для организации учета расходования материалов в цементной, металлургической, горнодобывающей, химической, комбикормовой и других отраслях промышленности (рис. 6.10).

В общей сложности существует более 6000 вариантов исполнения дозатора, что позволяет подобрать оптимальное решение практически для любых требований производства. Выбор конкретного исполнения дозатора производится специалистами компании при помощи специально разработанного программного обеспечения и зависит от ряда факторов, информации о которых берется из опросного листа.



Рис. 6.10. Ленточный весовой дозатор непрерывного действия типа ДН-У

Дозатор управляется электронным контроллером. Ленточный конвейер с регулируемым асинхронным приводом снабжен тензометрической весоизмерительной системой и датчиком скорости движения ленты. В процессе работы происходит непрерывное взвешивание материала, проходящего над весоизмерительным устройством, а также измерение скорости движения ленты. Управляющий контроллер рассчитывает текущую производительность дозатора и, при необходимости, формирует корректирующий сигнал на регулируемый частотный привод. Предел допускаемой относительной погрешности дозирования не более $\pm 0,5\%$.

В зависимости от физико-механических характеристик дозируемых материалов применяются различные варианты исполнений приемного бункера (стандартный, клинкерный, удлиненный для трудносыпучих материалов и бункер с успокоительной камерой для подвижных материалов). Предусматривается возможность установки стержневого шибера или шиберной задвижки, а также аспирационного укрытия.

Для химической промышленности выпускаются дозаторы с обрешиванием всех барабанов и роликов, с антикоррозионным покрытием металлических конструкций. Для мелкодисперсных материалов разработана конструкция дозатора, оснащенного роторным питателем с единой системой управления. Для дозирования зависающих материалов дозатор комплектуется вибробункером.

Для работы дозатора с питающим устройством на загрузке (тарельчатый, роторный, шнековый питатель) разработана конструкция с дополнительным весоизмерительным узлом и единой системой управления.

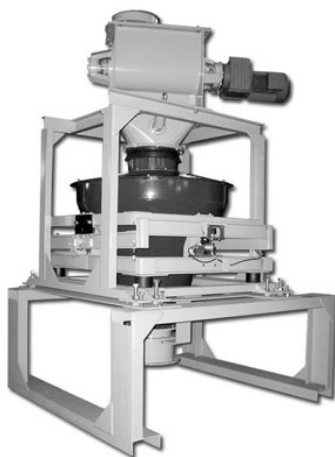


Рис. 6.11. Дифференциальный дозатор типа ДД

Система управления ленточными весовыми дозаторами 4488 ДН-У выполняется на базе современных промышленных контроллеров производства Siemens и Schneider Electric с применением частотных преобразователей фирм Danfoss и Schneider Electric, мотор-редукторов Sew – Eurodrive и Bauer, шкафов управления производства фирм Rittal, Schneider Electric, низковольтной аппаратуры фирм ABB, Schneider Electric.

Компания выпускает также дифференциальные дозаторы ДД (рис. 6.11), основные характеристики которого даны в табл. 6.10 [20].

ООО "Биохим-ТЛ" [21] предлагает весовой дозатор Van Aarsen (рис. 6.12) для дозирования компонентов, входящих в смеси в небольших количествах [22].

6.10. Характеристика дозаторов ДД

Общие сведения

Назначение:	для весового дозирования сыпучих материалов (цемент, песок, гипс, форсуночное топливо, зола-унос, пыли газоочисток и др.).
Устройство:	дифференциальный дозатор представляет собой бункер, опирающийся на тензодатчики, снабженный устройством разгрузки с электронной системой управления.

Технические характеристики

Производительность	0,032...32 м ³ /ч
Относительная погрешность дозирования	Не более ± 1 %
Размер фракции дозируемого материала	До 5 мм
Насыпная масса дозируемого материала	0,4...1,8 т/м ³
Температура дозируемого материала	-30...+100 °С
Температура окружающей среды	-40...+40 °С
Режим работы	Непрерывный
Тип привода	Асинхронный электропривод
Степень защиты по ГОСТ 14254-96	IP-65



Рис. 6.12. Весовой дозатор Van Aarsen

Стандартный модуль дозирования и взвешивания фирмы Van Aarsen позволяет дозировать 8 компонентов. Объединяя два и более модуля дозирования и взвешивания, количество компонентов может быть увеличено до 16, 24 или даже больше. Системы дозирования и взвешивания малых компонентов фирмы Van Aarsen подходят для широкого диапазона сырья, используемого в комбикормовой промышленности, с различным объемным весом и характеристиками сыпучести. Дозирование осуществляется посредством дозирующих устройств, задвижки которых приводятся в действие гидравлическими цилиндрами. Положение этих дозирующих задвижек контролируется дистанционным датчиком, без непосредственного контакта.

Дозируемые с помощью устройств компоненты подаются в весовой бункер, установленный на трех датчиках. Электрический сигнал от датчиков нагрузки определяет вес бункера. Колебания до 10 г, работа при предельных температурах и перегрузки до 150 % от номинального груза не причиняют никакого ущерба датчикам нагрузки.

ООО "НПО Валентина" специализируется на поставках отечественного и зарубежного метрологического оборудования для промышленных производств, предприятий нефтегазового комплекса [23] и предлагает бункерные и конвейерные весы. Весы бункерные "ВБС-10", "ВБС-150" [24] предназначены для статического взвешивания и дозирования сыпучих и жидких материалов, находящихся в бункерах и емкостях. Весы могут быть использованы в химической, металлургической, горнодобывающей и других отраслях промышленности. В основу работы весов заложен тензометрический принцип преобразования взвешиваемой массы в электрический сигнал.

Основные характеристики весов "ВБС-10" представлены в табл. 6.11.

6.11. Основные характеристики весов "ВБС-10" и "ВБС-150"

<i>ВБС-10</i>	
Наибольший предел взвешивания, кг	10 000
Наименьший предел взвешивания, кг	200
Дискретность отсчета, кг	10
Погрешность взвешивания, кг, в диапазоне:	
от 200 до 5 000;	± 10
от 5 000 до 10 000	± 20
<i>ВБС-150</i>	
Наибольший предел взвешивания, кг	150
Наименьший предел взвешивания, кг	2
Дискретность отсчета, кг	100
Погрешность взвешивания, кг, в диапазоне:	
от 100 до 50 000	± 100
от 50 000 до 200 000	± 200
<i>Прибор весоизмерительный имеет канал связи с ЭВМ верхнего уровня</i>	
Индикация	Цифровая
Режим работы весов	Непрерывный
Питание от сети переменного тока:	
напряжением, В;	$220 \pm \frac{22}{33}$
частотой, Гц	50 ± 1
Потребляемая мощность, Вт, не более	15
Расстояние от бункера до прибора, м, до	100
Расстояние от бункера до прибора, м, до	10

Весы конвейерные тензометрические "ВКТ-3" [25] предназначены для измерения текущих значений и суммарного количества сыпучих материалов, транспортируемых ленточными конвейерами в непрерывно действующие технологические агрегаты (бункера, дробилки, мельницы, печи и др.). Могут использоваться в тяжелых условиях промышленной эксплуатации цветной и черной металлургии, химической, строительной и других отраслей промышленности, где требуются непрерывное измерение расхода и дозирование сыпучих материалов и где нет возможности использования встраиваемых в существующие технологические конвейеры весов. Принцип действия весов основан на преобразовании с помощью тензорезисторного датчика и датчика скорости ленты транспортера величины массы материала, находящегося на транспортере весов, в электрический сигнал постоянного тока, пропорциональный текущему расходу материала. Количество транспортируемого сыпучего материала определяется путем интегрирования текущего расхода в устройстве суммирования. Основные характеристики представлены в табл. 6.12.

В состав весов входит: ленточный транспортер, предназначенный для перемещения взвешиваемого материала и передачи нагрузки на встроенный в транспортер тензометрический датчик; датчик перемещения конвейерной ленты ДТН-5; датчик скорости ленты ДТС-3; устройство преобразования БОИ-3В.

ООО "Эталон-Техно", которое является одним из крупнейших поставщиков весоизмерительного оборудования [26], предлагает бункерные весы "Поток" (рис. 6.13) для автоматического взвешивания хорошо сыпучих продуктов, таких как зерно, гранулированный комбикорм, крупы и другие с аналогичными механическими характеристиками, поступающие непрерывным потоком. Производительность до 220 т/ч. Бункерные весы могут работать в режиме бесконечного перевешивания потока или формирования конечных доз продукта.

6.12. Основные характеристики весов "ВКТ-3"

Диапазон производительностей конвейера, т/ч	От 0,8 до 100
Относительная погрешность, %	1
Ширина ленты транспортера, мм	650, 800

Питание от сети переменного тока частотой 50 Гц: напряжение, В; потребляемая мощность, кВА	220 1,5
Режим запуска коррекции массы тары	Ручной или автоматический
Период автоматической коррекции массы тары, ч	1...15
Длина линии связи от преобразователя до сумматора, м	Не более 3000
Выходной сигнал постоянного тока, мА	0...5
Температура взвешиваемого материала, °С	Не более 65
Насыпная плотность взвешиваемого материала, т/м ³	Не менее 0,8
Крупность взвешиваемого материала, мм	1...100



Рис. 6.13. Весы бункерные "Поток"



Рис. 6.14. Дозатор весовой дискретного действия ДВДД-НОТИС

Предприятие "НОТИС Урал" [27] предлагает широкий спектр порционных дозаторов, которые могут быть использованы при реализации двухстадийной технологии непрерывного весового дозирования сыпучих материалов. Например, однокомпонентные дозаторы весовые дискретного действия ДВДД-НОТИС [28] могут работать как самостоятельно, так и в комплекте с упаковочным оборудованием (рис. 6.14). В дозаторах используется микропроцессорное управление, позволяющее плавно менять производительность вибропитателя, что обеспечивает быстрый и точный набор дозы.

Дозатор имеет следующие функции: дозирование продукта в соответствии с заданной массой дозы; возможность задания с блока управления (в пределах, установленных на данный тип дозатора) требуемой массы дозы; автоматическое бракование набранной дозы, если отклонение действительного значения ее массы от заданного превышает установленный пользователем предел; накопление и хранение информации о количестве навешанных доз и суммарной массы навешанных доз не менее чем за 10 часов работы; индикация на алфавитно-цифровом дисплее текущего значения веса, режима работы дозатора, наименования и значения вводимых параметров, сообщения об ошибках и неисправностях, аварийной остановке и блокировке работы в

случае нарушения режима работы дозатора (прекращение поступления дозируемого продукта, неверно набранной дозы и т.п.).

Предприятие выпускает также дозирочно-упаковочные машины МДУ-НОТИС [29], которые предназначены для автоматического весового дозирования сыпучих, гранулированных, кристаллических, мелкоштучных порошкообразных мало пылящих продуктов и материалов и автоматического формирования, наполнения, запаивания и отрезания пакетов из полиэтиленовой пленки. Самонастраивающаяся система дозирования обеспечивает высокую точность и скорость дозирования. С точки зрения реализации технологии двухстадийного дозирования следует отметить, что производительность машин – до 70 доз в минуту.

ООО "МАКИЗ УРАЛ" [30] предлагает практически весь спектр упаковочного оборудования и фасовочного оборудования МАКИЗ: автоматические упаковочные линии, вертикально упаковочные машины для упаковки, автоматы упаковочные, фасовочно-упаковочные полуавтоматы, дозаторы весовые для фасовки, дозаторы шнековые, планируется производство горизонтально-упаковочной машины, консультации по фасовке и упаковке, консультации по организации упаковочного производства. Производительность от 5 до 50 упаковок в минуту. Вес упаковываемого продукта от 5 грамм до 50 килограмм. При производстве упаковочного оборудования МАКИЗ используется пневматика известной японской фирмы SMC и весоизмерительная тензобалка известной южно-корейской фирмы CAS.

Дозатор весовой дискретного действия ДС [31] предназначен для автоматического дозирования любых сыпучих материалов в технологических линиях предприятий металлургической, цементной, горнорудной, строительных материалов и других отраслей промышленности (рис. 6.15). Дозатор весовой состоит из: грузоприемного устройства с приводом разгрузочного механизма (пневматическим или электромеханическим); тензорезисторных датчиков с узлами встройки; соединительных коробок с комплектом кабелей; системы управления; загрузочного механизма; разгрузочного механизма.

Физико-механические свойства дозируемых сыпучих материалов: объемная плотность (0,1...4,0) т/м³; влажность, не более 15 %; концентрация пыли, не более 4 мг/м³.



Рис. 6.15. Дозатор ДС



Рис. 6.16. Автоматические бункерные весы

НПФ "Эталон-тензо" [32], являясь производителем весоизмерительного оборудования, предлагает комплекс услуг по проектированию, изготовлению, модернизации, автоматизации, сервисному обслуживанию электронных промышленных весов и дозаторов, а также весовых дозирующих линий и узлов. Специалистами проектно-конструкторского отдела фирмы специально для решения проблемы разработаны автоматические порционные бункерные весы (рис. 6.16).

Работа устройства возможна как в режиме совершенно автономного устройства, так и в совокупности с другими аналогичными устройствами, выполняющими общую, более сложную задачу, например многокомпонентное дозирование. В последнем случае общее управление группой дозаторов и, возможно, другими устройствами (транспортеры, норрии, смесители и т.п.) осуществляется от одного удаленного компьютера. Удаленный компьютер представляет собой или обычный IBM-совместимый офисный компьютер, или промышленную рабочую станцию. Управляющая программа удаленного компьютера может работать под управлением Windows ®. Даже в простейшем варианте автономного устройства связь с удаленным компьютером (RS-232, RS-485 или локальная сеть) может использоваться для получения итоговых отчетов о работе дозатора, а также для наблюдения за текущим состоянием устройства. Калибровка весов осуществляется нажатием всего нескольких клавиш на панели управления. Устройство не нуждается в периодической перекалибровке. Настройка параметров дозирования может осуществляться как вручную, с панели управления, так и по командам от удаленного компьютера.

Основные характеристики бункерных весов приведены в табл. 6.13.

Запуск процесса дозирования возможен как непосредственно с клавиатуры управляющего устройства, так и по команде от удаленного компьютера. После запуска процесс дозирования может быть в любой момент времени прерван или временно приостановлен (с последующим возобновлением) как с панели управления (при работе в режиме автономного устройства), так и по команде от удаленного компьютера. В логику работы управляющего устройства заложены элементы самообучения. В процессе дозирования управляющее устройство накапливает и анализирует статистическую информацию об инерции срабатывания заслонок, средней величине остатка продукта в весовой емкости после завершения разгрузки, среднее время одного цикла взвешивания. Анализ статистической информации позволяет управляющему устройству с максимальной возможной точностью выдерживать заданную величину отвеса и заданную производительность (если ее необходимо ограничивать).

6.13. Основные характеристики бункерных весов

Технические характеристики	Типы весов						
	ВП-50	ВП-100	ВП-200	ВП-500	ВП-5	ВП-10	ВП-20
Наибольший предел взвешивания (НПВ), кг	50	100	200	500	5000	10 000	20 000
Наименьший предел взвешивания (НмПВ), кг	1	1	1	4	40	100	200
Цена поверочного деления, кг	0,05	0,05	0,05	0,2	2	5	10
Максимальный предел погрешности взвешивания каждой дозы	±1(2)						
Температура эксплуатации, °С	-30...+45						
Защита от проникновения пыли и влаги, IP контроллера управления грузоприемного устройства	IP-65 IP-66/68						
Электропитание, В	$220 \pm \frac{10}{15} \%$, 50 Гц						
Потребляемая мощность, Вт	200						
Номинальное значение давления сжатого воздуха, МПа	0,25...0,45						
Расход воздуха, м ³ /ч	1,2...1,5						

6.2. ДОЗАТОРЫ, ВЫПУСКАЕМЫЕ ЗАРУБЕЖНЫМИ КОМПАНИЯМИ

Точное дозирование необходимо при производстве полимерных материалов. Компания Motan [33], всемирно признанный лидер в области автоматизированных систем дозирования и смешивания полимерных материалов, создала целую гамму устройств для гравиметрического дозирования сырья. При использовании этих устройств на литьевых и выдувных машинах, а также экструдерах, компания Motan предлагает целый ряд дозирующих систем GRAVICOLOR. Пять моделей этой серии удовлетворяют производственные требования самых различных сфер переработки пластмасс. Для минимальных и небольших расходных количеств на литьевых машинах используются модели GRAVICOLOR-30 и GRAVICOLOR-100 в качестве отдельных устройств. Для больших расходных количеств литьевого и экструзионного производств рекомендуются модели GRAVICOLOR-300, 600 и GRAVICOLOR-1000. Они устанавливаются либо непосредственно на перерабатывающую машину, либо обеспечивают производственную линию сырьем, как центральная смешивающая система. Все эти дозирующие системы работают по принципу точного порционного взвешивания до шести разных компонентов. Точность дозирования отдельных компонентов достигает ± 0,1 %. Упрощенная процедура запуска системы исключает необходимость дополнительного калибрования материала.

Надежная система управления вибрациями обеспечивает точный, надежный и бесперебойный режим работы устройств при сильных вибрациях и колебаниях. Системы управления для регулирования расхода и весовых количеств являются новыми важными решениями в автоматизации рабочих процессов и повышении надежности экструзионного процесса.

Система COLORNet является вторым поколением управления серии GRAVICOLOR и первым звеном в новой концепции управления. Следует выделить три важных аспекта в этой новой концепции: все устройства позволяют обеспечивать единое и простое обслуживание всей системы в минимальные сроки с минимальным количеством ошибок в процессе обслуживания; все управление разделено на несколько стандартных операций, находящихся в постоянной взаимосвязи друг с другом, что позволяет снизить основные расходы для всего последующего цикла эксплуатации; коммуникационный процесс между отдельной машиной и различными уровнями предприятия также имеет стандартное решение.

Управление COLORNet представляет собой модуль децентрализованной концепции управления на базе локальной сети, в которой используются общепринятые мировые стандарты, такие как TCP/IP, HTTP, E-Mail и т.д. Используя обычную локальную сеть, цветной графический дисплей обеспечивает пользователю дополнительную поддержку за счет доступа в различные сервисные и производственные меню. Ввод параметров осуществляется довольно эргономично в одно касание или же посредством пера непосредственно на сенсорном экране. Обслуживание системы возможно на многих языках.

Кроме дозирующих систем серии GRAVICOLOR, с помощью COLORNet можно также осуществлять процесс управления и обслуживания для семи отдельных загрузчиков, а также вакуумной установки. Небольшие модули позволяют, в данном случае, отказаться от отдельных систем управления на каждом загрузчике. Комплексные системы загрузки взаимодействуют между собой посредством децентрализованной локальной сети. Этот обмен данными именуется как взаимодействие процессов и является дальнейшим шагом в концепции децентрализованного управления. Такая система управления позволяет вводить в память и управлять на уровне локальной сети до 100 рецептурами. При этом рецептурная память, если это необходимо, может иметь неограниченное расширение за счет главной системы визуализации.

Управление на базе локальной сети является последовательным шагом в направлении децентрализованной системы управления. Децентрализованное управление позволяет, кроме всего прочего, осуществлять быстрый ввод в эксплуатацию всей линии, быстрый демонтаж существующей линии, а также значительно снижать затраты на техническое обслуживание или же на устранение поломок. Система управления, в основном, состоит из стандартных компонентов, которые легко располагаются по месту в зависимости от конкретной задачи без применения дополнительного специального оборудования. Получаемые за счет децентрализованного управления масштабные решения позволяют увеличить экономическую эффективность, так как средства, инвестируемые в решение задач, связанных с управлением, четко отвечают требованиям, которые предъявляются ко всему комплексу оборудования. Другим важнейшим аспектом децентрализованной системы управления является то, что любые изменения структуры всего комплекса оборудования не требуют значительных затрат на его переоборудование.

За счет применения мировых стандартов Ethernet, а также TCP/IP уже на уровне основной комплектации обеспечивается возможность постоянной коммуникации для всех систем управления. Это позволяет также обеспечивать дистанционную диагностику и получение сигналов о неисправностях через Интернет с помощью стандартных Browser вместо привязанных к управлению программаторов. Посредством FTP обеспечивается также принципиальная возможность обновления программного обеспечения системы управления. Интерфейс системы Ethernet позволяет осуществлять ряд диспетчерских функций и функций сообщений для стандартных внешних систем. Компания Motan предлагает для этих целей различное программное обеспечение для ведения документации, а также для подготовки производственных данных. Все программы работают на базе операционной системы Windows, тем самым обеспечивается дальнейшая обработка данных через обычные банки данных, как, например, Microsoft Excel или же программы для рабочих параметров. Получение отчетов по Masterbatch, расходу материала, рецептурам и калибровке весов является стандартным решением на базе функций отчетов.

С целью обеспечения "вертикальной интеграции", данные стандартные решения обеспечивают взаимосвязь любого уровня оборудования со всеми уровнями предприятия, а также с Интернетом. Производственные данные могут беспрепятственно передаваться от дозирующего устройства на компьютер в офисе (например, Excel). Обслуживание, контроль сигналов и учет рабочих параметров возможны на всех уровнях управления без каких-либо дополнительных затрат. Дистанционное обслуживание установки может осуществляться через Интернет. Это позволяет, таким образом, осуществлять диагностику возникающих неполадок без дополнительных, требующих больших затрат устройств, а также возможные обновления программ, графиков и т.д. через такие службы Интернета, как FTP.

В смысле "горизонтальной интеграции" коммуникационная способность систем управления предлагает целый ряд существенных преимуществ и на технологическом уровне. С помощью унифицированного интерфейса каждая система управления может осуществлять обмен данными с любым количеством обслуживаемых устройств. Оператор может, таким образом, осуществлять обслуживание устройств или же контролировать аварийные сигналы из нескольких мест.

Из зарубежных производителей весовых дозаторов наиболее широко представлена в России компания "Schenck Process GmbH" [34]

Ленточные дозаторы серии MULTIDOS, выпускаемые компанией, находят самое широкое применение в области непрерывного, гравиметрического дозирования и отличаются высокой точностью $\pm 0,25\%$. Семейство MULTIDOS включает несколько серий, созданных под конкретные задачи. Ленточные дозаторы серии MULTIDOS H [35] подходят для применения с наивысшей производительностью для материалов с большим насыпным весом и при больших разгрузочных отверстиях бункеров.

Типичные области применения: загрузка сырьевых, цементных и угольных мельниц, печей и составление смесей в металлургии. Ленточный дозатор для непрерывного и порционного дозирования сыпучих материалов MULTIDOS L (рис. 6.17) [36] обеспечивает производительность от 100 кг/ч до 38 т/ч.



Рис. 6.17. Ленточный дозатор MULTIDOS L7

Шнековый дозатор MechaTron Coni-Flex (рис. 6.18) широко используется для непрерывной подачи плоскосыпучих материалов [37].

Компания предлагает также систему многокомпонентного дозирования MULTIGRAV (рис. 6.19), которая при диапазоне регулирования 1:80 обеспечивает высокую точность дозирования [38].



Рис. 6.18. Шнековый дозатор MechaTron Coni-Flex



Рис. 6.19. Система многокомпонентного дозирования MULTIGRAV

Одной из ведущих компаний по производству дозирующего оборудования является "SchenckAccurate" [39], выпускающая ленточный дозатор серии DEA для весового непрерывного дозирования различных материалов от паст до хорошо сыпучих зернистых материалов. В зависимости от модификации ширина ленты составляет 304,8 или 609,6 мм. Производительность до 47 м³/ч.

Устройство для измерения весового расхода непрерывного потока сыпучего материала (VULTICOR MASS FLOW METER) может легко встраиваться в технологические линии. Поток зернистого материала подается в устройство и попадает внутрь измерительного колеса, состоящего из двух колец и соединительных радиальных перегородок. Измерительное колесо посредством вала соединено с электродвигателем, имеющим постоянную

скорость вращения. Частицы материала при попадании в верхнюю часть измерительного колеса отражаются конусом, изменяют направление движения и выходят наружу между перегородками, вызывая при этом силы Кориолиса. Устройство фиксирует эти силы посредством силового датчика, как изменение крутящего момента на валу электродвигателя. Выходной сигнал датчика с помощью электроники преобразуется в весовой расход. По заявлению компании, погрешности измерения весового расхода не превышает 0,5 %. Следует отметить, что в информационных материалах не указан промежуток времени, в течение которого отбирается каждая проба для последующе-

го расчета погрешности определения весового расхода. Данное устройство позволяет определять весовую производительность потока с расходом до 300 м³/ч и кроме определения весовой производительности может быть использовано для непрерывного и порционного весового дозирования хорошо сыпучих материалов. К сожалению, отсутствует информации о минимально допустимом весовом расходе потока и о величине возникающих при этом погрешностей. Как отмечалось ранее, именно при малых производительностях возникают максимальные погрешности, и уменьшение этих погрешностей, т.е. повышение точности дозирования при малых производительностях, является одной из наиболее сложных проблем при проектировании весовых дозаторов. Компания производит и более простые устройства для определения весового расхода, в которых датчик фиксирует реактивные силы, возникающие при движении потока по изогнутому лотку. Эти устройства могут быть использованы при производительностях от 30 до 600 т/ч и имеют погрешность ± 2 %.

На рисунке 6.20 представлено несколько моделей весовых шнековых дозаторов. Дозатор серии "MECHATRON MC 3-A" (рис. 6.20, а) имеет производительность от 0,0084 до 9,24 м³/ч и создан специально для производств с повышенными санитарно-гигиеническими требованиями. Одной из особенностей дозатора является конический бункер с подвижной боковой поверхностью, что препятствует налипанию дозируемого материала на внутреннюю поверхность бункера и облегчает его очистку при переходе от одного материала к другому. Дозатор серии "MECHATRON LS" (рис. 6.20, б) может успешно использоваться для микродозирования, поскольку его производительность изменяется от 56 до 588 000 см³/ч. На рисунке 6.20, в показан шнековый дозатор "MECHATRON MC", который может дозировать как по объему, так и по весу. Производительность дозатора от 0,0014 до 9,24 м³/ч. На рисунке 6.20, г показан дозатор с очень широким диапазоном изменения производительности (от 0,0084 до 31,84 м³/ч).



а)



б)



в)



г)

Рис. 6.20. Шнековые дозаторы компании SchenckAccurate

Компания выпускает также электронные контроллеры как для отдельных дозаторов, так и для дозирующих линий, включающих десятки дозаторов.

6.3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСФАЛЬТОСМЕСИТЕЛЬНЫМИ И БЕТОНОСМЕСИТЕЛЬНЫМИ ЗАВОДАМИ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА

Асфальтосмесительные заводы непрерывного технологического цикла эксплуатируются в России сравнительно недавно. К сожалению, отечественное машиностроение не производит подобные заводы, поэтому на данный момент в эксплуатации находятся Wibau Astec и Benninghoven совместного производства США и ФРГ. Несколько иная ситуация в сфере производства бетона. Заводы ДС-50Б и ДС-109, производимые ранее на Украине, достаточно успешно работают во многих дорожно-строительных организациях [40].

Можно считать, что сформировался общий подход к комплексной автоматизации заводов данного типа. Основное отличие данных заводов от традиционных классических вертикальных следует из самого названия технологического процесса – "непрерывный". Следовательно, основной узел дозирования компонентов готового продукта в данном случае принципиально иной. Обычно это конвейерные питатели (щебень, песок), шнековые или лепестковые питатели (минеральный порошок, цемент), а также насосы с регулируемой производительностью для подачи вязущих материалов. Ленточные питатели условно можно разделить на два типа: весовые и объемные. Объемные питатели оснащены силовым регулируемым электроприводом (асинхронный двигатель + электромагнитная муфта – "Wibau Astec", "Benninghoven"), двигателем постоянного тока – ДС-109, редуктором-вариатором – ДС-50Б и датчиком скорости ленты (тахогенератор – ДС-50Б, импульсный цифровой датчик – "Wibau Astec", "Benninghoven").

Весовые питатели, кроме вышеперечисленного оборудования, укомплектованы датчиком веса.

Единственным достоинством объемных дозаторов является их упрощенная конструкция и, следовательно, меньшая стоимость изготовления механической и электронной части. Отсутствие контроля массы на данных дозаторах, а также разная объемная плотность материала и необходимость (из-за разных рецептов) оперативно менять тип компонента (материала) на любом из дозаторов приводят к увеличению времени процесса калибровки (необходимо калибровать все типы материалов, которые будут использоваться на данном дозаторе) и усложнению сопутствующего программного обеспечения (создание базы материалов, коэффициентов калибровки, автоматический контроль за действиями оператора во время калибровки и выбора рецепта).

Этих недостатков лишены весовые дозаторы. Достаточно один раз произвести калибровку – и дозатор готов к работе с любым компонентом, причем тип материала значения не имеет. Кроме этого, появляется возможность достоверно контролировать наличие материала на ленте питателя и автоматически производить запуск, например, подающего конвейера ("ДС-109") или вибратора бункера ("Wibau Astec", "Benninghoven"). Кинематическая схема дозатора "ДС-109" удачна и тем, что в ней исключено влияние натяжения ленты на показания весового датчика. В качестве силового привода предпочтительнее использовать преобразователь частоты 3-фазного тока с асинхронным электродвигателем. Данные преобразователи сейчас являются самым современным решением в области регулируемого электропривода, отличаются высокой надежностью и позволяют существенно экономить электроэнергию.

Шнековые и лепестковые питатели применяются на материалах, обладающих большой текучестью (цемент, минеральный порошок). По основным принципам дозирования они во многом подобны ленточным питателям. Как и в случае с ленточными питателями, их условно можно разделить на те же типы – весовые и объемные. Главное отличие – наличие/отсутствие весовых датчиков. Все вышеперечисленные достоинства и недостатки обоих типов ленточных питателей, а также рекомендованные ранее силовые электроприводы применимы к шнековым и лепестковым питателям.

Для дозирования битума на заводах "Wibau Astec" и "Benninghoven" установлены шестеренчатые насосы с регулируемым электроприводом постоянного тока. Учитывая то, что зависимость объема подачи битума от оборотов двигателя может быть нелинейной (из-за износа шестерен и внутренних утечек в насосе), данный узел комплектуется еще и прецизионным счетчиком с овальными шестернями. Конструктивно он выполнен аналогично насосам, установлен на подающей битумной магистрали и выполняет те же функции, что и импульсный цифровой датчик на ленточном питателе.

Для того, чтобы все вышеперечисленные дозирующие системы нормально работали, а именно, выдавали то количество материала, которое задает оператор завода, необходимо произвести калибровку данных систем и вычислить поправочный коэффициент, который присутствует во всех формулах производительности. Данная операция производится с использованием автомобильных статических весов ("Wibau-Astec") либо весового бункера-накопителя ("Benninghoven", ДС-50Б и ДС-109).

Несколько упрощенная формула вычисления коэффициента "k", например для весового питателя, будет иметь вид:

$$k = \frac{M_B r T_B}{N(T_G) r M_C},$$

где M_B – взвешенная на статических весах масса материала, отпущенная дозатором на фиксированной скорости (при калибровке – 90 % от максимальной); T_B – время, за которое отгружен данный объем (масса) материала; $N(T_T)$ – количество импульсов датчика скорости ленты за время T_B ; M_C – усредненный мгновенный вес материала, находившегося на ленте питателя в процессе калибровки.

Аналогичным методом вычисляются коэффициенты для остальных дозирующих узлов сыпучих компонентов, вяжущих материалов (битума) и воды.

Сравнивая характеристики дозирующих систем заводов непрерывного технологического цикла, необходимо отметить, что наиболее качественно решить задачу процесса дозирования компонентов можно только с использованием весовых дозаторов сыпучих материалов и узлов подачи вяжущих, оснащенных прецизионным счетчиком расхода. Для точного и более технологичного процесса калибровки всех систем необходимо наличие в составе завода большегрузных автомобильных весов, интегрированных в общую систему управления. В последнем случае появляется дополнительная возможность осуществлять автоматизированный учет всего грузопотока на данном заводе.

В общем случае все системы автоматического управления, разработанные ООО "АСУ Промвест" [41], выполняют следующие функции. Последовательность запуска/останова силовых и дозирующих узлов осуществляется системой управления самостоятельно с минимальным участием оператора; в процессе работы система управления постоянно осуществляет контроль за состоянием силового оборудования и при возникновении нештатной ситуации осуществляет автоматический останов процесса с выдачей сообщения о причине, его вызвавшей; коэффициенты калибровки, производительность питателей сыпучих компонентов, а также требуемый расход битума (воды) вычисляются системой с учетом значений влажности материалов; в рабочем режиме и режиме калибровки на экране отображается фактический вес готового продукта (материала), находящегося в бункерах.

Программа управляющего компьютера имеет следующие режимы:

- калибровка бункера готового продукта, конвейерных весов, питателей сыпучих материалов, узла дозирования битума (весового дозатора цемента и системы управления дозированием воды);
- ввод (корректировки) рецептов асфальтобетонной (бетонной) смеси, общей производительности завода и коэффициентов влажности каждого компонента; основной (рабочий) режим с индикацией фактической мгновенной производительности питателей, узла дозирования битума (дозатора цемента и мгновенного расхода воды); режим диагностики возможных неисправностей тензорезистивных датчиков и управляющих контроллеров; режим индикации общего количества асфальтобетонной (бетонной) смеси, произведенной на данном заводе за любой требуемый период; режим индикации общего расхода инертных материалов и битума (цемента и воды); режим ручного управления дозирующими узлами и силовыми приводами завода.

Опыт организации непрерывных процессов на асфальтобетонных заводах показывает, что в настоящее время имеется реальная возможность создания полностью автоматизированных технологических систем производства многокомпонентных смесей различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Весоизмерительная компания "Тензо-М". О компании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/26>, свободный.
2. Дозаторы сыпучих материалов непрерывного действия Альфа ДЛТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=193>, свободный.
3. Расходомеры сыпучих материалов серии "Лотос" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=194>, свободный.
4. Весы бункерные электронные "Поток" <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=71>, свободный.
5. Многокомпонентное дозирование в приготовлении комбикормов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/164>, свободный.
6. Дозатор "ГАММА" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=113> Гамма-М, свободный.
7. Тензорезисторный датчик Н4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=>, свободный.
8. Тензорезисторный датчик Т2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenso-m.ru/pages/21?id=72>, свободный.
9. Дозатор весовой ДВ – 500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consit.ru/03obor_doza_dor_v_500.shtml, свободный
10. Дозатор добавок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consit.ru/03obor_doza_dor_do_4p.shtml, свободный.

11. ООО "ТензоПрибор" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tenzo-pribor.ru/about.html>, свободный.
12. Ленточный весовой дозатор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ДВЛ . <http://www.tenzo-pribor.ru/cat798.html>, свободный.
13. Компания "Сигнал-Пак" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.signal-pack.com/signalpack/>, свободный.
14. Линейный весовой дозатор В1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.signal-pack.com/catalog/description/24/>, свободный.
15. Предприятие "РОСАТ" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosat.ru/?page=about>, свободный.
16. Дозаторы непрерывного действия ДНД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosat.ru/?page=katalog&id=100012>, свободный.
17. Компания ТАУ2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tau2.ru/dvt.html>, свободный.
18. ЗАО "Агроэсорт" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agroescort.spb.ru/about.php>, свободный.
19. Ленточный весовой дозатор непрерывного действия типа 4488 ДН-У [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://agroescort.spb.ru/pr_lent_dozator.php, свободный.
20. Дифференциальный дозатор ДД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://agroescort.spb.ru/pr_diff_dozat.php, свободный.
21. ООО "Биохим-ТЛ" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biohim.com.ru/about>, свободный.
22. Технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://biohim.com.ru/technology>, свободный.
23. ООО "НПО Валентина" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprovalentina.ru/firm/>, свободный.
24. "ВБС-10" весы бункерные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprovalentina.ru/catalog/dev/7517/>, свободный.
25. Весы конвейерные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nprovalentina.ru/catalog/dev/7563/>, свободный.
26. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.etalon-tehno.ru/cf_menu_about.htm, свободный.
27. НОТИС Урал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.notisural.ru/>, свободный.
28. Дозатор весовой ДВДД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.notisural.ru/dvdd.htm>, свободный.
29. Машина дозировочно-упаковочная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.notisural.ru/mdu_01.htm, свободный.
30. Макиз-Урал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.makizural.ru/izmz/izmz.htm>, свободный.
31. Дозатор весовой дискретного действия ДС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.amtenzo.ru/catalog/46/162/>, свободный.
32. НПФ "Эталон-тензор" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.etalontenzo.spb.ru/>, свободный.
33. Motan GmbH – Германия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.polymer.ru/company_info.php?id_company=132, свободный.
34. International Business Segments [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schenckprocess.ru/>, свободный.
35. Ленточный дозатор MULTIDOS Н [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schenckprocess.ru/products/1/11/1/2/>, свободный.
36. Ленточный дозатор MULTIDOS L [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schenckprocess.ru/products/1/11/1/1/>, свободный.
37. Дозатор MechaTron® Coni-Flex® [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schenckprocess.ru/products/1/11/3/1/>, свободный.
38. MULTIGRAV® [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.schenckprocess.ru/products/1/11/4/1/>, свободный.
39. Schenck Accurate [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.accuratefeedes.com>, свободный.
40. Автоматизированные системы управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://asupromwest.boom.ru/AllProcPlant.html>, свободный.
41. Продукция АСУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://asupromwest.boom.ru/Product.html>, свободный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поскольку любой технологический процесс базируется на определенной массе исходного сырья, учете выработанной продукции, обеспечении заданного количества продукта по массе (или поддержание заданного расхода), то весовое дозирование находит самое широкое применение в различных отраслях промышленности. Поскольку дозирование зернистых материалов – механический процесс, т.е. процесс, скорость которого определяется законами физики твердого тела, при выборе серийно выпускаемого дозатора или проектировании нового необходимо знать и учитывать физико-механические свойства дозируемого материала, в первую очередь, углы и коэффициенты трения.

При выборе весового дозатора необходимо учитывать, что фирмы-производители указывают погрешность дозирования при средней или даже при максимальной производительности. При минимальной производительности погрешности дозирования будут больше, иногда в несколько раз.

За счет использования датчиков расхода, установленных между питателем и транспортерной лентой, а также специальной программы обработки информации можно существенно повысить точность серийно выпускаемых ленточных дозаторов.

Весовое непрерывное дозирование с высокой точностью можно организовать на базе технологии двухстадийного дозирования, используя серийно выпускаемые порционные дозаторы и питатели, например вибрационные, для преобразования отдельных порций в непрерывный поток.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ЗЕРНИСТЫЙ МАТЕРИАЛ КАК ОБЪЕКТ ДОЗИРОВАНИЯ	5
1.1. Общие сведения	5
1.2. Гранулометрический состав	7
1.3. Плотность сыпучих материалов	16
1.4. Сыпучесть зернистых материалов	22
1.5. Углы и коэффициенты трения	25
1.5.1. Углы естественного откоса	25
1.5.2. Угол обрушения	30
1.5.3. Начальное сопротивление сдвигу, угол внутреннего трения и угол сопротивления сдвигу	32
1.5.4. Коэффициенты внутреннего и внешнего трения	34
1.5.5. Углы и коэффициенты трения покоя и движения	37
Список литературы	39
Глава 2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЕСОВОГО ДОЗИРОВАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	45
2.1. Общие сведения	45
2.2. Обобщенная функциональная схема весовых дозаторов и ее элементы	47
2.2.1. Питатели	48
2.2.2. Измерительная система	51
2.2.3. Управляющая система	56
2.3. Основные способы весового дозирования	57
2.4. Производительность и точность дозирования	68
2.5. Корректировка производительности	72
Список литературы	76
Глава 3. ПИТАТЕЛИ	79
3.1. Ленточные питатели	79
3.2. Шнековые и спиральные питатели	82
3.3. Секторные питатели	88
3.4. Вибрационные питатели	89
3.5. Трубчатые питатели	95
3.6. Гравитационные питатели	98
3.7. Питатели с эластичным рабочим органом	101
3.8. Тарельчатые питатели	103
Список литературы	107
Глава 4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ	110
4.1. Механическая система	110
4.2. Датчики	117
4.2.1. Омические датчики смещения	117
4.2.2. Емкостные датчики смещения	123
4.2.3. Индуктивные датчики смещения	124
4.2.4. Пьезоэлектрические датчики силы	126
4.2.5. Датчики с частотным выходом	129
4.2.6. Оптические датчики смещения	136
Список литературы	146
Глава 5. ТЕХНОЛОГИЯ ДВУХСТАДИЙНОГО ДОЗИРОВАНИЯ	148
5.1. Принцип двухстадийного дозирования, функциональная схема и ее элементы	148
5.1.1. Порционный дозатор	149
5.1.2. Преобразователь отдельных порций в непрерывный поток	152

5.2. Трубчатый преобразователь	153
5.2.1. Движение материала в поперечном сечении трубы	153
5.2.2. Осевое движение материала	156
5.2.3. Моделирование процесса непрерывного дозирования	159
5.2.4. Экспериментальные исследования процесса двухстадийного дозирования с использованием вращающейся трубы	165
5.3. Вибрационный преобразователь	168
5.3.1. Качественный анализ процесса движения отдельной порции сыпучего материала на наклонном вибрирующем лотке	168
5.3.2. Изменение формы продольного сечения отдельной порции сыпучего материала при вибрации	170
5.3.3. Движение центра тяжести порции сыпучего материала вдоль лотка	176
5.3.4. Математическое описание процесса преобразования отдельных порций в непрерывный поток	186
5.4. Шнековый преобразователь	191
5.4.1. Теоретическое определение объемной эффективности шнековых питателей	195
5.4.2. Объемная производительность спиральных питателей	197
5.5. Организация процесса непрерывного смешивания с использованием технологии двухстадийного дозирования	199
5.6. Способ непрерывного дозирования сыпучих материалов и устройство для его осуществления	206
5.7. Методика расчета конструктивных и режимных параметров дозирочно-смесительной установки	212
Список литературы	216
Глава 6. ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОЗИРОВАНИЯ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ	219
6.1. Дозаторы, выпускаемые отечественными компаниями	219
6.2. Дозаторы, выпускаемые зарубежными компаниями ...	244
6.3. Автоматизированные системы управления асфальтосмесительными и бетоносмесительными заводами непрерывного технологического цикла	250
Список литературы	253
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	256