

И.Н. ШУБИН, М.М. СВИРИДОВ, В.П. ТАРОВ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ И
ОБОРУДОВАНИЕ**

**Сыпучие материалы
и их свойства**

• Издательство ТГТУ •

УДК 621.6.04(07)
ББК Л365-5я73
Ш951

Рецензенты:

Доктор технических наук, зав. лабораторией ГНУ ВИИТИН
С.А. Нагорнов

Кандидат технических наук, доцент
В.Я. Борщев

Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П.

Ш951 Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 76 с.

В пособии освещены вопросы методик и экспериментальной базы оценки физико-механических свойств сыпучих материалов, рассмотрены основные методы анализа проб и качества приготовленных смесей. Приведен лабораторный практикум, отражающий способы количественного определения как отдельных характеристик и комплексных показателей сыпучих материалов, так и их смесей.

Предназначено для студентов, магистрантов и бакалавров технических вузов машиностроительных и инженерно-экологических специальностей 260601, 240801, 151001, 150400, изучающих конструирование аппаратов, переработку и утилизацию сыпучих материалов дневных, заочных и дистанционных форм обучения.

УДК 621.6.04(07)
ББК Л365-5я73

**ISBN 5-8265-
0425-0**

© Шубин И.Н., Свиридов М.М., Таров В.П., 2005
© Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), 2005
Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

И.Н. ШУБИН, М.М. СВИРИДОВ, В.П. ТАРОВ

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ И
ОБОРУДОВАНИЕ**

**Сыпучие материалы
и их свойства**

Утверждено Ученым советом ТГТУ
в качестве учебного пособия



Тамбов
Издательство ТГТУ
2005

Учебное издание

ШУБИН Игорь Николаевич,
СВИРИДОВ Михаил Михайлович,
ТАРОВ Владимир Петрович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Сыпучие материалы и их свойства

Учебное пособие

Редактор В.Н. Митрофанова

Компьютерное макетирование И.В. Евсеевой

Подписано к печати 25.11.2005.
Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объем: 4,42 усл. печ. л.; 4,38 уч.-изд. л.
Тираж 100 экз. С. 759

Издательско-полиграфический центр ТГТУ
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ВВЕДЕНИЕ

В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ ЧЕЛОВЕК ИМЕЕТ ДЕЛО С МАТЕРИАЛАМИ РАЗЛИЧНЫХ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ – ЖИДКОСТИ, ГАЗЫ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ БАЗИРУЕТСЯ НА ВЗАИМНОМ ВЛИЯНИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО ЦЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. ДЛЯ ПЕРЕЧИСЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВОК ИСПОЛЬЗУЮТ ДОСТАТОЧНО НАДЕЖНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНЫХ СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ И КОНЕЧНЫХ ПРОДУКТОВ. СЛОЖНЕЕ ОБСТОИТ ДЕЛО С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ, НАЗЫВАЕМЫХ СЫПУЧИМИ. ХАРАКТЕРИЗУЯ КАТЕГОРИЮ "СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ", ЧАЩЕ ВСЕГО ПОНИМАЮТ, ЧТО ЭТО КОЛЛЕКТИВ ЧАСТИЦ ОБЛАДАЮЩИХ ОДНОЙ ПРИРОДОЙ. ПРИМЕРАМИ МАТЕРИАЛОВ ТАКОГО ТИПА МОГУТ БЫТЬ: ЗЕРНА ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР, РЕЧНОЙ ПЕСОК И Т.П. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТАКИХ ПРОДУКТОВ – СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ; ПРОИЗВОДСТВА: ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ЛЕКАРСТВЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ И Т.Д. ПРОЦЕССАМИ, В КОТОРЫХ ОБЪЕКТОМ ПЕРЕРАБОТКИ ЯВЛЯЮТСЯ СЫПУЧИЕ МАТЕРИАЛЫ ИЛИ ИХ СМЕСИ (КОМПОЗИЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ В ОПРЕДЕЛЕННОМ СОТНОШЕНИИ ДВА И БОЛЕЕ КОМПОНЕНТОВ) МОЖНО НАЗВАТЬ: ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ, ДОЗИРОВАНИЕ, СМЕШИВАНИЕ, ПРЕССОВАНИЕ, ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ И МНОГИЕ ДР., ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА.

Приготовление однородных по составу композиций из твердых материалов, находящихся в зернистом или порошкообразном состоянии – смешивание является широко используемым процессом. Во многих случаях от его исхода зависит качество готового продукта.

Несмотря на то, что твердые материалы перерабатываются в промышленности с незапамятных времен и почти во всех ее отраслях, смешивание сыпучих материалов и в настоящее время остается мало изученным физическим процессом [14], [16], [17], [20]. Основной причиной является неоднозначное трактование понятия "сыпучий материал" и "смесь сыпучих материалов" и как следствие неточное нахождение количественного проявления свойств этих продуктов. Стабильно определяемой является только природа (происхождение) названных веществ. Свойства же зависящие в значительной мере от размеров, геом частиц образующих коллективы меняются в широких пределах [15].

НАСТОЯЩАЯ РАБОТА СТАВИТ СЛЕДУЮЩИЕ ЗАДАЧИ: ПОМОЧЬ ПОНЯТЬ ФИЗИЧЕСКУЮ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРАБОТКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ, ИЗУЧИТЬ МЕТОДИКИ И АППАРАТУРНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СВОЙСТВ, УСТАНОВИТЬ ПРИЧИНЫ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ В ПОЛУЧАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ, НАКОПИТЬ ДОСТАТОЧНО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕВОДА СЫПУЧЕГО ПРОДУКТА В КАТЕГОРИЮ ОБЪЕКТА С ЗАДАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.

КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ НАДЕЕТСЯ, ЧТО РАБОТА ПО ПРЕДЛАГАЕМОМУ УЧЕБНОМУ ПОСОБИЮ СФОРМИРУЕТ БАЗУ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ОБРАЗЦОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И ПРИБЛИЗИТ ВРЕМЯ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ С ПРОГНОЗИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ.

1 ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ

По гранулометрическому составу сыпучего материала оценивают количественное распределение составляющих его частиц по линейным размерам. Большинство сыпучих материалов имеет частицы неправильной формы, для которых в качестве определяющего линейного размера [14] может быть принят условный диаметр d_i , вычисляемый по трем измерениям частицы (длине, высоте и ширине частицы), как среднее арифметическое

$$d_i = \frac{lbh}{3} \quad (1)$$

или среднее геометрическое значение

$$d_i = \sqrt[3]{lbh}, \quad (2)$$

где l , b , h – соответственно длина, ширина и высота обмеряемой частицы.

Сыпучий материал только в редких случаях состоит из частиц одинакового размера. Чаще в нем величина d_i изменяется дискретно от какого-то минимального размера d_{\min} до максимального d_{\max} . Отношение d_{\min}/d_{\max} у некоторых сыпучих материалов может принимать весьма большие значения (свыше 1000). Гранулометрический состав полидисперсных материалов можно характеризовать рядом распределения дискретной случайной величины d_i в котором перечисляются измеренные значения этой случайной величины $d_1; d_2; \dots; d_n$ с соответствующими им вероятностями p_1, p_2, \dots, p_n или частотами n_1, n_2, \dots, n_n . Определение всего ряда дискретных случайных значений d_i для полидисперсных материалов с большим отношением d_{\min}/d_{\max} вызывает затруднение, поэтому этот ряд заменяют дискретным рядом классов (фракций) значений d_i . В зависимости от размера частиц сыпучие материалы подразделяют на кусковые ($d_{\max} > 10$ мм), крупнозернистые ($d_{\max} = 2 \dots 10$ мм), мелкозернистые ($d_{\max} = 0,5 \dots 2$ мм), порошкообразные ($d_{\max} = 0,05 \dots 0,5$ мм), пылевидные ($d_{\max} < 0,05$ мм). Для определения гранулометрического состава сыпучих материалов используют методы: прямого измерения, ситового анализа, седиментационного анализа, фильтрации, разделения в поле центробежных сил, электроклассификации, фотоимпульсный, телевизионный и кондуктометрический.

Прямое измерение размеров частиц используют для определения гранулометрического состава в основном кускового, крупнозернистого, мелкозернистого и порошкообразного материалов. При этом методе частицы измеряют с помощью соответствующего измерительного инструмента, а мелкозернистые материалы – с помощью инструментального микроскопа. Перед измерением с помощью микроскопа порошкообразные материалы размешивают в глицерине, затем смесь переносят на предметное стекло и наносят его тонким слоем. В некоторых случаях порошкообразные материалы смешивают с полимеризующимися смолами (шеллаком, бакелитовым лаком, эпоксидной смолой и т.д.). После полимеризации затвердевший образец шлифуют и полируют. Шлиф анализируют под микроскопом. Достоверные результаты определения размеров частиц могут быть достигнуты только путем измерения большого их количества. Если частицы имеют разную форму и размеры, то число измерений должно быть не менее 2000, поэтому метод непосредственного измерения считается трудоемким [14].

Ситовой анализ заключается в разделении порции сыпучего материала на классы (фракции) с помощью последовательного просеивания при встряхивании через набор сит с отверстиями различной величины. Этот метод можно использовать для всех категорий сыпучего материала, за исключением пылевидного. Значение класса определяют размером отверстий соседних сит. Например, если нижнее сито имеет отверстие, равное 0,5, а верхнее 0,7 мм, то между этими ситами после просеивания останется фракция сыпучего материала класса (0,5...0,7) мм. Фракция, прошедшая сквозь верхнее сито с отверстиями a мм, обозначается $-a$, а оставшаяся на нижележащем сите с отверстиями b мм обозначается $+b$, в этом случае ширина класса зависит от подбора соответствующих сит.

Седиментационный метод анализа гранулометрического состава сыпучего материала основан на различии в скоростях осаждения твердых частиц в жидкости. Этот анализ, как правило, проводят в ламинарной области осаждения, в которой скорость осаждения шарообразных частиц определяется уравнением W_0

$$W_0 = 0,056 \frac{gd^2}{\nu} \frac{\rho_1 - \rho}{\rho}, \quad (3)$$

где W_0 – диаметр частицы, м; ρ_1 и ρ – плотность частицы и жидкости в кг/м^3 ; ν – вязкость жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; g – ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Анализ этого уравнения показывает, что при заданных свойствах жидкости и твердого материала скорость осаждения частиц пропорциональна квадрату их диаметра. Измеряя время прохождения частицами пути от свободного уровня жидкости до некоторого контрольного, можно рассчитать скорости их падения, а затем и их диаметры. Классифицировать пробы сыпучего материала по этому способу трудно, так как приходится следить одновременно за падением множества частиц. Значительно проще фиксировать не моменты прохождения частицами контрольного уровня, а прибавку в весе суммы частиц, прошедших этот уровень. На этом принципе конструируют седиментационные весы, используемые для проведения гранулометрического анализа проб. Такими весами можно анализировать мелкозернистые и порошкообразные сыпучие материалы. Анализ пылевидных материалов на этих весах затруднен из-за малой скорости осаждения частиц в седиментационной жидкости.

Фильтрационный метод анализа используют для определения внешней удельной поверхности частиц сыпучего материала, величина которой связана со средним диаметром частиц уравнением

$$S = \frac{G}{\rho_1 d}, \quad (4)$$

где S – внешняя удельная поверхность частиц материала в пробе; G – вес пробы; ρ_1 – плотность материала частиц; d – средний диаметр частиц материала в анализируемой пробе.

Для экспериментального определения значений S может быть использован метод, основанный на измерении скорости фильтрации воздуха через слой испытуемого материала.

Электроклассификацию сыпучих материалов ведут на установках, работающих по тому же принципу, что и электрофильтры. Электроклассификацию используют, в основном, для экспресс-анализа гранулометрического состава тонких порошков.

Фотоимпульсный метод определения гранулометрического состава сыпучих материалов позволяет с помощью электронной аппаратуры быстро определить дисперсность порошков, состоящих из частиц одинакового химического и минералогического состава. Фотоимпульсный метод заключается в поочередном измерении количества света, рассеиваемого отдельными частицами порошка. Для проведения дисперсного анализа фотоимпульсным методом порошок преобразуют в аэрозоль низкой концентрации, а затем пропускают его через измерительный элемент маленького объема, где частицы поочередно освещаются пучком света. Рассеянный частицами свет собирается вогнутым эллиптическим зеркалом и направляется в фотомножитель, где преобразуется в электрический импульс, амплитуда которого зависит от условного диаметра частиц. Амплитудное распределение этих импульсов регистрируется многоканальным амплитудным анализатором. Зная зависимость между размером частиц и амплитудой импульсов, можно по показаниям амплитудного анализатора определить средний диаметр частиц отдельных фракций исследуемого порошка. Следовательно, для каждого типа порошка необходимо предварительно установить эту зависимость, т.е. построить ее в виде тарировочной кривой. Световой луч от источника света фокусируется специальным объективом в точку, совпадающую с фокусом эллиптического зеркала. Поток частиц пересекается в этой точке с лучом света. Место пересечения этих потоков и создает измерительную ячейку маленького объема. Аэрозоль низкой концентрации исключает искажения от одновременного измерения нескольких частиц, и вероятность совместного полета двух частиц практически близка к нулю. Для измерения частиц диаметром $d_i < 100$ мкм их концентрация в потоке должна быть не выше, чем 10^3 шт. в 1 см^3 объема газа [10]. Фотоимпульсный метод может быть рекомендован для анализа дисперсного состава порошкообразных материалов, имеющих однородный химический и минералогический состав и размеры частиц в диапазоне 4...100 мкм [12].

Телевизионный метод анализа гранулометрического состава сыпучих материалов является весьма перспективным экспресс-методом, который позволяет вести эти определения бесконтактным способом и в потоке. В зависимости от размера гранул на каждую линейную длину изображения приходится то или иное определенное их количество. Границу между частицами можно определить по изменению яркости их поверхности, она более темная. Следовательно, если в каждой строке или столбце изображения поверхности анализируемой пробы материала известно число перепадов яркости, т.е. перехода от белого к черному, то по их числу можно определить и диаметр частиц. Перепад яркости вырабатывает в

схеме выделения короткие импульсы строчной частоты, которые подсчитываются в специальной схеме измерения. Частота следования этих импульсов связана непосредственно с количеством гранул на элементе кадра, т.е. с их крупностью.

Кондуктометрический метод анализа дисперсного состава порошкообразных материалов относится к современным экспресс-методам, он успешно используется во многих отраслях промышленности [18]. Кондуктометрический метод анализа дисперсионного состава позволяет определять частицы размером от 0,3 до 800 мкм. Диаметр микроотверстия выбирают в зависимости от диапазона диаметров частиц, подлежащих измерению. Основные недостатки метода: малый диапазон размеров диаметров частиц, которые могут быть измерены на одной пробирке (примерно 40 : 1); необходимость суспендирования порошка и контроля за чистотой отверстия.

1.2 НАСЫПНАЯ ПЛОТНОСТЬ

Насыпной плотностью или объемной массой сыпучего материала ρ_n называют массу материала, находящуюся в единице занимаемого им объема. Величину ρ_n используют при определениях необходимого объема бункеров, смесителей, при расчетах расхода энергии на перемешивание сыпучего материала, давления столба сыпучего материала на стенки бункеров и т.д. Насыпная плотность сыпучего материала зависит от размера составляющих его частиц, их средней плотности, влажности, от плотности укладки частиц в слое. Она не остается постоянной даже при покое сыпучего материала. Под влиянием вибраций стенок сосуда сыпучий материал со временем уплотняется и его насыпная плотность достигает некоторого предельного значения ρ_{max} . В процессе движения, перемещения, смешения, наоборот, происходит разрыхление материала. Насыпная плотность при этом уменьшается, приближаясь к предельному значению ρ_{min} . Отношение ρ_{max}/ρ_{min} для некоторых материалов достигает значений 1,52.

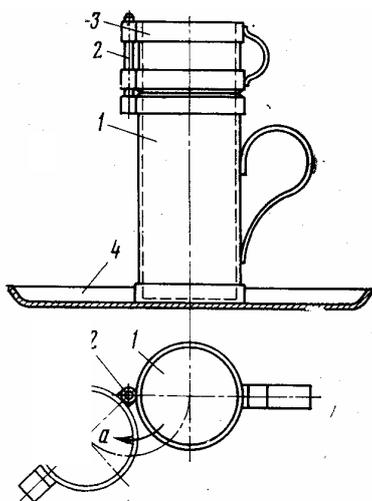


Рис. 1 Прибор для определения насыпной плотности сыпучих материалов

Насыпная плотность, как правило, увеличивается по мере измельчения частиц сыпучего материала, поэтому всегда необходимо указывать, при каких значениях среднего размера частиц она получена [2]. По величине насыпной плотности различают сыпучие материалы: легкие (до 600 кг/м³), средние (600...1100 кг/м³), тяжелые (1100...2000 кг/м³), весьма тяжелые (более 2000 кг/м³). Насыпную плотность определяют с помощью прибора (рис. 1), состоящего из стакана 1, в верхней части которого закреплена штырем 2 подвижная царга 3. Исследуемый материал загружают в прибор до верхнего уровня царги, после чего она поворачивается в положение *a*, и материал, находящийся в ней, сбрасывается на поддон 4. Нижняя кромка царги выравнивает уровень сыпучего материала в стакане 1. После снятия царги со штыря 2 стакан взвешивают. Насыпную плотность исследуемого сыпучего материала подсчитывают по формуле

$$\rho_n = \frac{G_1 - G}{V}, \quad (5)$$

где G_1 и G – вес стакана с материалом и без него, кг; V – внутренний объем стакана, м³.

Насыпную плотность материала следует отличать от его, так называемой пикнометрической плотности ρ , под которой понимают среднюю плотность сыпучего материала (удельный вес), определяют ее следующим образом. В стеклянный мерный цилиндр насыпают порцию исследуемого материала весом G , затем наливают жидкость, в которой частицы этого материала не растворяются. Объем этой жидкости $V_{ж}$ должен быть таким, чтобы уровень образующейся в цилиндре суспензии был выше первоначального уровня сухого сыпучего материала. По величине объема суспензии V_c , а также величинам G и $V_{ж}$ плотность материала частиц подсчитывают по формуле

$$\rho = \frac{G}{V_c - V_{ж}}, \quad \text{кг/м}^3. \quad (6)$$

1.3 ВЛАЖНОСТЬ

Влажность сыпучих материалов влияет на многие их свойства: текучесть, коэффициент внутреннего трения, смерзаемость, сводообразование, комкуемость, плотность и т.д. Связь влаги с материалом может быть механической, физико-химической и химической. Влага, находящаяся между частицами материала и на их поверхности, имеет механическую связь с материалом. Физико-химическую связь с материалом имеет та влага, которая проникает в поры частиц за счет адсорбции или диффузии. Химически связанной является влага гидратная или кристаллизационная. Простым тепловым высушиванием можно удалить механически связанную влагу и частично физико-химическую. Эту удаляемую высушиванием влагу называют свободной влагой, а оставшуюся при этом в материале влагу – гигроскопической, которая не может быть удалена полностью из материала простым нагреванием. Для характеристики количества влаги, содержащейся в твердых телах, используют два понятия: влажность и влагосодержание.

Под влажностью W_b понимают отношение веса влаги, содержащейся в сыпучем материале, к весу влажного материала

$$W_b = \frac{G_b - G_c}{G_b}, \quad (7)$$

где G_b и G_c – вес влажного и вес абсолютно сухого материала.

Под влагосодержанием W понимают отношение веса влаги, содержащейся в сыпучем материале, к весу абсолютно сухого материала

$$W = \frac{G_b - G_c}{G_c}. \quad (8)$$

Величины W_b и W в некоторых случаях выражают в процентах. Присутствие влаги в сыпучем материале увеличивает его плотность. Связь влагосодержания с плотностью для зернистых и кусковых материалов выражается формулой

$$\rho_b = \rho(1 + W), \quad (9)$$

а для пылевидных и порошкообразных материалов

$$\rho_{\text{в}} = \rho \frac{1+W}{\left(1 + \frac{W}{3} \frac{\rho_1}{\rho_{\text{ж}}}\right)}, \quad (10)$$

где $\rho_{\text{в}}$ и ρ – плотность влажного и сухого сыпучего материала; ρ_1 – плотность частиц, составляющих сыпучий материал; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, заполняющей поры сыпучего материала, кг/м³.

Методы определения влажности сыпучих материалов могут быть разделены на прямые и косвенные. Прямые методы основаны на непосредственном измерении веса влаги и веса сухого вещества в навеске. К прямым методам относятся: метод высушивания, заключающийся в воздушно-тепловой сушке навески и измерении ее веса до сушки и после сушки; экстракционный метод, при котором влага извлекается из материала водопоглощающей жидкостью с последующим определением процентного содержания влаги в экстракте; карбидный метод, основанный на извлечении влаги с помощью карбида кальция, смешиваемого с сыпучим материалом и вступающего с ней в реакцию с образованием ацетилена, по объему которого судят о весе влаги. Косвенные методы позволяют судить о влажности путем измерения функционально связанных с ней величин. К ним относятся следующие методы: электрические, при которых измеряют электрофизические характеристики сыпучего материала, изменяющиеся в зависимости от влажности (электрическая проводимость, емкость и т.д.; механические – основанные на измерении механических характеристик сыпучих материалов, которые имеют соответствующую функциональную связь с влажностью; оптические – при котором о влажности судят по величине отраженного от поверхности сыпучего материала света; калориметрический – основанный на изменении теплоемкости материала в зависимости от его влажности; ультразвуковой – основанный на способности сыпучих материалов снижать скорость распространения ультразвуковых волн. Среди перечисленных методов наибольшее распространение получил метод высушивания, как наиболее точный. Однако для измерения влажности сыпучего материала этим методом требуется значительное время, поэтому его нельзя использовать для непрерывного контроля материала в потоке.

Все большее распространение получают электрические методы, которые отличаются быстротой анализа, достаточной точностью и позволяют производить непрерывный контроль влажности. Из электрических методов наиболее точным считается емкостный, основанный на измерении диэлектрической проницаемости сыпучих материалов. Большинство твердых капиллярно-пористых тел имеет диэлектрическую проницаемость $\epsilon_a = 1 \dots 6$, для воды же $\epsilon_a = 81$. Поэтому присутствие влаги заметно сказывается на величине ϵ_a . Диэлектрическую проницаемость влажного материала определяют по емкости конденсатора, между обкладками которого находится исследуемый материал.

Датчик емкостного влагомера чаще выполняется в виде двух полых концентрических цилиндров, пространство между которыми заполняется путем свободной засыпки исследуемым материалом [14]. Емкость датчика

$$c = 0,24 \frac{\epsilon_a h}{\lg d_2 / d_1}, \text{ пф}, \quad (11)$$

где h – высота засыпки материала между цилиндрами, см; d_2 – внутренний диаметр наружного цилиндра, см; d_1 – наружный диаметр внутреннего цилиндра, см; ϵ_a – диэлектрическая проницаемость исследуемого материала.

Из уравнения (11) видно, что между емкостью c и диэлектрической проницаемостью ϵ_a при прочих равных условиях существует прямая зависимость. Диэлектрическая проницаемость ϵ_a зависит от температуры, поэтому датчик для поддержания в нем постоянной температуры приходится термостатировать. Так как для большинства сыпучих материалов абсолютная величина емкости датчика составляет несколько пикофард, в электронных влагомерах используют высокочастотную резонансную схему измерения емкости. По этой схеме работают электронные влагомеры, погрешность которых не превышает 0,5 %.

В основу ультразвукового метода определения влажности твердых материалов положена зависимость скорости распространения ультразвуковых волн от упругих свойств материала

$$c_i = \frac{1}{\sqrt{\rho\beta}}, \quad (12)$$

где c_i – скорость распространения ультразвука; ρ – плотность исследуемого материала; β – адиабатическая сжимаемость исследуемого материала.

В большом диапазоне влажности между величиной скорости распространения ультразвука и влажностью массы имеется однозначная зависимость. Ультразвуковые волны создаются в простейших схемах ультразвуковых влагомеров при помощи пьезоэлектрического преобразователя, возбуждаемого электрическим сигналом. После прохождения массы материала ультразвуковой сигнал принимается другим пьезопреобразователем, в котором акустическая волна преобразуется в электрический импульс. Зная базовое расстояние B и измерив время прохождения акустического сигнала по материалу l , можно определить скорость его распространения в материале

$$c_i = \frac{B}{t}. \quad (13)$$

В автоматических ультразвуковых влагомерах используется более сложная схема, поэтому возникшие в приемном пьезопреобразователе импульсы преобразуются в одиночный импульс, напряжение которого измеряется индикатором. Индикатор путем предварительных измерений можно проградуировать в процентах влажности конкретного материала. Так как скорость распространения ультразвуковой волны зависит от плотности материала, то при определениях влажности сыпучих материалов необходимо их предварительно уплотнять, что снижает точность метода.

1.4 ТЕКУЧЕСТЬ

Текучность сыпучих материалов характеризует их способность вытекать с той или иной скоростью из отверстий [20]. Она зависит от гранулометрического состава материала, формы и размера частиц, коэффициента внутреннего трения, влажности и т.д. Текучность сыпучих материалов определяет многие конструктивные особенности бункерных и дозирующих устройств, смесителей. От нее зависит продолжительность операций заполнения и опорожнения смесителей. Текучность можно характеризовать коэффициентом текучности, который у многих авторов [2], [14], [20] определяется по-разному

$$K = tr^{2,58} / G; \quad (14)$$

$$K_T = \frac{\tau R^{2,58}}{mg}; \quad (15)$$

$$K'_T = K_T \rho g. \quad (16)$$

Одной из причин следует считать различие в подходе к этому параметру, например, что по (15), способность материала течь, определяют по массовой, а не линейной скорости перемещения потоков материалов. Массовая скорость важна при заполнении пресс-форм порошками, где контроль обычно ведут по весу. Но она не является характеристикой динамики потока, требуемой при реализации механических процессов обработки сыпучих материалов. Учитывая, что скорость связана с объемной, а при известном сечении потока с линейной, наглядней оценивать текучесть через модифицированный коэффициент текучести (16), являющийся обратной величиной объемной скорости потока.

Методики же определения данного параметра отличаются в основном лишь нюансами и сводятся к пропусканию через тарированную воронку заданного объема исследуемого материала (рис. 2).

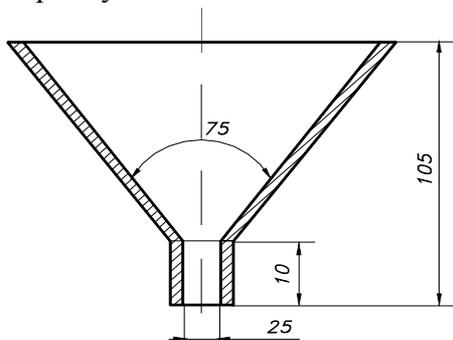


Рис. 2 Геометрия воронки

Порядок определения коэффициента текучести следующий. В воронку, при закрытой заслонке, насыпают 50...100 г исследуемого материала. Измеряют время истечения из воронки по (14), находят значение K . Для различных сыпучих материалов величина K колеблется в широких пределах: для металлических порошков от 1,2 до 6,4; для кварцевого песка от 3 до 4. Чем больше величина K , тем менее подвижен материал, тем медленнее он вытекает из отверстий.

Предельную скорость истечения сыпучих материалов через отверстия в днищах аппаратов подсчитывают в большинстве случаев по формулам

$$V = KF^n, \quad (17)$$

где F – площадь отверстия; K, n – опытные коэффициенты.

Гячев Л.В. для зерна предлагает использовать эту формулу в следующем виде [13]

$$V = (2,546 - 0,162 d)F^{0,25}, \quad (18)$$

где d – средний диаметр частиц материала, мм; F – площадь отверстия, м².

Для зернистых материалов большее соответствие экспериментам дает формула П.И. Лукьянова

$$V = 5730\sqrt{R}(R^2 - 1,9), \quad (19)$$

где V – предельная объемная скорость истечения, см³/мин; R – радиус отверстия, см; d – средний диаметр частиц материала, см.

Предельную скорость истечения порошкообразных материалов лучше рассчитывать по формуле Р.Л. Зенкова, в которой учитываются их физико-механические свойства

$$V \approx \lambda \sqrt{2g(2,1R - 3,4 \frac{\tau_0}{\rho_H})}, \quad (20)$$

где τ_0 – начальное сопротивление сдвигу; ρ_H – насыпная плотность сыпучего материала; g – ускорение силы тяжести; λ – коэффициент истечения (для хорошо сыпучих материалов $\lambda = 0,3 \dots 0,5$, для плохо сыпучих $\lambda = 0,2 \dots 0,25$).

Связные сыпучие материалы в определенных условиях могут и не вытекать из отверстий. Это происходит в том случае, когда над отверстием образуется свод из материала. Сводообразование сыпучих материалов объясняется возникновением в зоне разгрузочного отверстия такого напряженного состояния, при котором горизонтальные напряжения в слое частиц достигают наивысшего значения. Горизонтальные давления уплотняют материал, создают соответствующую вертикальную составляющую распора свода, которая становится достаточной для восприятия массы груза над отверстием.

Сводообразование можно устранить установкой вибраторов на наружной поверхности выпускного устройства, размещением в зоне разгрузки ворошителей или аэрацией находящегося там материала, выбором соответствующего размера отверстий. Среди перечисленных способов наиболее простым и действенным является последний: для предотвращения сводообразования при этом способе необходимо, чтобы размер выпускного отверстия был больше диаметра наибольшего сводообразующего отверстия $d_{св}$. Величина $d_{св}$ может быть определена экспериментально на простом приборе, представляющем собой полый цилиндр, в днище которого вставляется сменная шайба с известным размером отверстия.

Дженике Э.В. разработал метод аналитического расчета величины $d_{св}$ с учетом физико-механических свойств сыпучего материала, геометрии выпускного отверстия и материала его стенок [6], [21].

1.5 УГОЛ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА

Углом естественного откоса называют угол α , образуемый линией естественного откоса (отвала) сыпучего материала с горизонтальной плоскостью [11]. Величина угла естественного откоса зависит от сил трения,

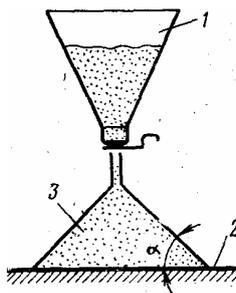


Рис. 3 Схема устройства для измерения угла естественного откоса сыпучих материалов

возникающих при перемещении частиц сыпучего материала относительно друг друга, и сил сцепления между ними. Угол α может быть измерен с помощью простейшего устройства, изображенного на рис. 3. При определениях угла α исследуемый сыпучий материал выпускают из воронки 1 на горизонтальную площадку 2, в результате чего там образуется конус 3 из материала. Затем с помощью угломера измеряют угол наклона α образующей этого конуса к горизонту – это и будет угол естественного откоса исследованного материала. Угол α определяет подвижность сыпучего материала, его необходимо учитывать при конструировании лотков, течек, выпускных конических частей бункеров. Во всех случаях

следует принимать угол наклона поверхностей к горизонту, по которым стекает данный сыпучий материал, превосходящим по величине его угол естественного откоса.

Величина угла α зависит от состояния поверхности опорной площадки. Чем меньше шероховатость этой поверхности, тем меньше угол естественного откоса. Снижается значение угла α и в том случае, когда горизонтальная опорная поверхность вибрирует. Поэтому при проектировании бункеров и течек для малоподвижных с большим значением угла естественного откоса сыпучих материалов внутренние поверхности этих устройств шлифуют, а во время работы их с помощью вибраторов приводят в колебательное движение с весьма малыми амплитудами.

Поведение сыпучего материала в технологических процессах определяется его способностью оказывать сопротивление изменению объема, формы, нарушению целостности. Характерной особенностью сыпучих материалов является подвижность частиц относительно друг друга (сыпучесть) и способность перемещаться под действием внешней силы. Сыпучесть зависит от гранулометрического состава материала, его влажности, степени уплотнения и проявляется по-разному (рис. 4).

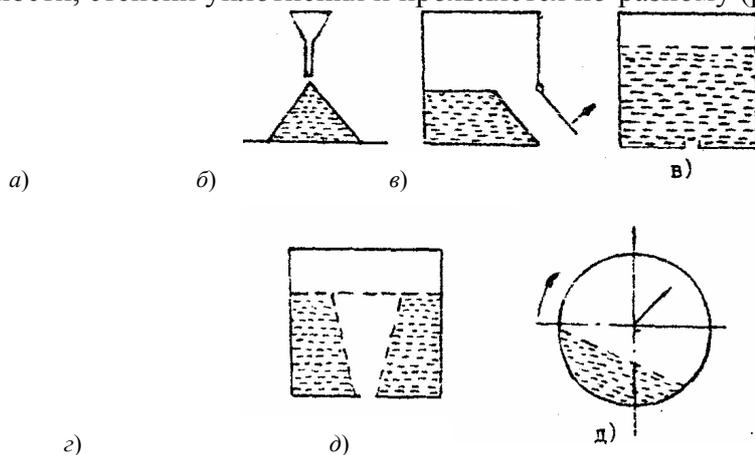


Рис. 4

Так, при насыпании сыпучего материала на горизонтальную поверхность из воронки (рис. 4, а) образуется конус с углом естественного откоса при основании. При удалении подпорной боковой стенки свод материала обрушивается, а свободная поверхность материала располагается под некоторым углом к горизонтальной плоскости (рис. 4, б).

В случае открытия отверстия в плоском днище бункера происходит частичное осыпание материала с образованием свода (при малом диаметре отверстия) или кратера (рис. 4, в, г). При прекращении вращения полого барабана с засыпанным материалом свободная поверхность также образует некоторый угол с горизонтальной плоскостью (рис. 4, д).

Сыпучесть характеризуется косвенными показателями, среди которых наибольшее распространение получил угол естественного откоса α_d . Широкое использование этого показателя при определении наклона стенок бункера, желобов объясняется простотой и надежностью его измерения.

Углом естественного откоса называется угол наклона образующей конуса сыпучего материала, отсыпанного без толчков и вибраций, к горизонтальной плоскости [3]. Эта характеристика связана одновременно с аутогезией, внутренним трением и плотностью частиц порошка и его гранулометрическим составом.

Наряду с углом естественного откоса различают угол обрушения α_n , который характеризует положение поверхности откоса, образованной в результате сползания части сыпучего материала. Угол обрушения всегда больше угла естественного откоса. Угол обрушения служит важным параметром при проектировании транспортных средств и бункеров для хранения сыпучих материалов и наряду с этим применяется в научных исследованиях. В литературе имеются и другие названия этих параметров: угол естественного откоса – динамический угол откоса, угол трения движения, угол насыпания; угол обрушения – статический угол откоса, угол трения покоя.

Экспериментально углы естественного откоса и обрушения можно определить следующими методами:

- 1 Насыпкой из воронки на горизонтальную плоскость.
- 2 Высыпанием из емкости при открытии окна.
- 3 Образованием кратера при истечении через щель или отверстие.
- 4 Переворачиванием емкости, частично засыпанной материалом.
- 5 Вращением барабана полого или содержащего лопасть.

Методы 1, 2, 3 позволяют определить только один угловой параметр, методы 4, 5 – два.

Насыпную плотность сыпучего материала определяют путем взвешивания сыпучего материала в измерительном стакане.

Любая деформация сыпучего материала сопровождается сдвигом, т.е. скольжением частиц одна относительно другой. В отличие от жидкостей сыпучие материалы могут выдерживать определенные усилия сдвига. Связь между предельным сопротивлением τ_α и нормальным напряжением σ_α в плоскости скольжения слоев выражается законом Кулона [7]

$$\tau_\alpha = c + f \sigma_\alpha, \quad (21)$$

где c – удельное сцепление частиц в сыпучем материале в Па; f – коэффициент внутреннего трения.

При $\sigma_\alpha = 0$, $c = \tau_0$, получим начальное сопротивление трения. Угол наклона линий, выражающих зависимость $\tau_\alpha = f(\sigma_\alpha)$, называется углом внутреннего трения. Зависимость между углом внутреннего трения и коэффициентом внутреннего трения следующая: $f = \operatorname{tg} \varphi$.

При расчете сил трения сыпучего материала о стенки бункера и рабочие органы машин используется коэффициент внешнего трения сыпучего материала. Значения коэффициентов внутреннего и внешнего трения и соответствующих им углов, а также предельного сопротивления под нагрузкой и начального сопротивления сдвига определяют на специальных сдвиговых приборах. Однако динамическое поведение сыпучего материала нельзя оценить какой-либо одной характеристикой.

Для этой цели используют комплексные показатели, состоящие из совокупности физико-механических характеристик. Согласно [1] для классификации сыпучих материалов применительно к процессам, связанным с их перемещением и обработкой, предлагается комплексный показатель связности, характеризующий способность сыпучего материала образовывать устойчивые вертикальные откосы

$$h_c = \frac{4 \tau_0 \cos \varphi}{g \rho_n (1 - \sin \varphi)}. \quad (22)$$

В зависимости от величины h_p все сыпучие материалы подразделяются на 3 класса: несвязные, связно текучие и связные. Каждый класс делится на две группы. Выбор типа оборудования должен производиться с учетом физико-механических свойств.

Их учет при расчете и выборе оборудования обеспечивает гарантированную переработку мелкодисперсных связных материалов и достаточный запас надежности при переработке несвязных материалов.

Выбор конструкции оборудования, машины или аппарата для хранения, транспортирования или переработки сыпучего материала зависит от его гранулометрического состава и физико-механических характеристик.

1.6 АДГЕЗИЯ

Частицы сыпучих материалов способны прилипать к твердым поверхностям (подложкам). Это свойство, как и в случае прилипания жидкостей к подложкам, называют адгезией. В процессах смешения

ния, хранения, транспортирования адгезия – вредное свойство сыпучих материалов [2], [5], [8]. Ее необходимо учитывать при конструировании, изготовлении и эксплуатации смесителей, бункеров, выпускных устройств, транспортных линий. Адгезия частиц к твердым поверхностям обусловлена силами, различными по своей природе: молекулярными, капиллярными, электрическими и кулоновскими. Эти силы в большинстве случаев действуют одновременно. Однако в определенных условиях каждая из них может превалировать над другими. Молекулярные силы адгезии обусловлены ван-дер-ваальсовыми силами взаимодействия молекул частиц сыпучего материала и материала подложки. Они начинают проявляться еще до непосредственного контакта частиц с поверхностью и зависят от свойств пары контактирующих тел, размера частиц, шероховатости подложки, площади контакта.

Молекулярные силы адгезии можно уменьшить, во-первых, лучшей обработкой поверхности подложки (шлифованием, полированием), во-вторых, уменьшением размера частиц сыпучего материала.

Капиллярные силы адгезии возникают при конденсации паров воды из влажного воздуха, находящегося в порах сыпучего материала, и при наличии пленочной влажности материала. В этих случаях между частицей и подложкой возникает мениск, который силами поверхностного натяжения прижимает частицу к стенке. Капиллярные силы адгезии можно уменьшать гидрофобизацией подложки, т.е. превращением ее поверхности в несмачивающуюся по отношению к жидкости, присутствующей в сыпучем материале.

Электрические силы адгезии проявляются только при контакте частиц с подложкой. В условиях смещения, транспортирования частицы сыпучего материала трутся друг о друга о рабочие органы и стенки смесителя, бункера, лоток, приобретая электрический заряд. Знак заряда, его величина при прочих равных условиях зависят от материала частиц и предметов, о которые они трутся. Например, частицы каменной соли при трении об эбонит, целлулоид, стекло приобретают положительный заряд, а при трении о слюду, медь – отрицательный. При контакте таких частиц с подложкой наведенные на их поверхности заряды притягивают равные по величине и обратные по знаку заряды, расположенные на поверхности подложки. Это приводит к появлению на границе контактирующих тел контактной разности потенциалов, под действием которой они притягиваются друг к другу. Чем больше контактная разность потенциалов, тем значительнее электрические силы адгезии. Известно, что контактная разность потенциалов зависит, во-первых, от величины заряда на поверхности частицы и, во-вторых, от материала подложки. При соприкосновении частиц с полупроводником (окрашенный металл, пластмассы) возникает контактная разность потенциалов, значительно большая, чем в случае их контакта с проводником (металлы). Этим и объясняется тот факт, что к окрашенным поверхностям частицы пыли прилипают значительно сильнее, чем к чистым металлам.

Кулоновские силы адгезии возникают при подходе заряженных частиц к поверхности подложки. В этот момент на противоположной стороне подложки наводятся заряды, равные по величине заряду частиц, но противоположные по знаку. При этом, возникают так называемые силы зеркального отображения (кулоновские силы). Кулоновские силы проявляются только при наличии определенного зазора между частицами и подложкой. Когда частица касается подложки, происходит утечка зарядов, что приводит к снижению кулоновских сил. Чем больше проводимость стенки, тем меньше по величине остаточные кулоновские силы, а, следовательно, и силы адгезии. Влага на стенке тоже этому способствует. Составляющие компоненты силы адгезии по-разному зависят от радиуса частиц r . Эта зависимость оценивается следующим образом: для кулоновских сил – $1/r^2$; электрических – $r^{2/3}$; молекулярных – r , капиллярных сил – $r(1 - r^{x-1})$ (где $x > 1$).

Различная природа составляющих силы адгезии не позволяет найти единое средство к ее снижению. Например, гидрофобизация поверхности подложки снижает капиллярные силы, но повышает электрические и кулоновские силы; увеличение влажности материала снижает электрические и кулоновские силы, но приводит к повышению капиллярных сил. Чтобы оторвать частицу от подложки, надо приложить к частице соответствующую силу $F_{отр}$. Если сила отрыва $F_{отр}$ направлена перпендикулярно к подложке, то она идет только на преодоление сил адгезии $F_{ад}$, называемых силами статического прилипания. При тангенциальном направлении внешней силы к подложке она тратится на преодоление сил ста-

тического трения $F_{\text{тр}}$, обусловленных адгезионными силами. В случае направления, внешней силы под углом к подложке она тратится на преодоление как $F_{\text{тр}}$, так и $F_{\text{ад}}$. Следовательно, силы адгезии можно оценить величиной отрывающей силы $F_{\text{отр}}$. При этом используют следующие способы создания отрывающей силы: гравитационные, центробежные и вибрационные. При первом способе величину отрывающей силы $F_{\text{отр}}$ определяют по углу наклона подложки к горизонту, при котором частица начинает двигаться

$$F_{\text{отр}} = V(\rho_1 - \rho_2)g \sin \alpha, \quad (23)$$

где V – объем отрывающейся частицы; ρ_1, ρ_2 – плотность частицы и окружающей среды (воздуха или жидкости); g – ускорение силы тяжести; α – угол наклона подложки к горизонту.

При центробежном способе подложку вместе с частицами вращают, при этом

$$F_{\text{отр}} = V(\rho_1 - \rho_2)(\bar{j} + \bar{g}), \quad (24)$$

где \bar{j} – вектор центробежного ускорения; \bar{g} – вектор ускорения силы тяжести.

При вибрационном способе подложку вибрируют, применяя низкочастотные и высокочастотные колебания, при этом

$$F_{\text{отр}} = V(\rho_1 - \rho_2)(\bar{a} + \bar{g}). \quad (25)$$

Здесь \bar{a} – вектор ускорения колебательного движения. Адгезию характеризуют величиной v_F (числом адгезии), равной отношению веса частиц G , оставшихся на подложке после приложения к ним силы $F_{\text{отр}}$, к первоначальному их весу на подложке G_0

$$v_F = \frac{G}{G_0} 100 \%. \quad (26)$$

Число адгезии зависит от силы отрыва $F_{\text{отр}}$, поэтому многие исследователи предпочитают использовать ее для оценки адгезии. В некоторых случаях адгезию оценивают силой отрыва F_c , приходящейся на единицу поверхности контакта частиц и подложки. Если сила отрыва направлена тангенциально к подложке, то адгезию можно характеризовать косвенно через коэффициент внешнего трения f_1 , используя зависимость

$$F_{\text{тр}} = f_1 F_{\text{н}}, \quad (27)$$

где $F_{\text{н}}$ – нормально направленная к подложке сила, с которой слой частиц к ней прижимается.

1.7 СЛЕЖИВАЕМОСТЬ

При длительном хранении без перемещений многие мелкозернистые и порошкообразные материалы способны уплотняться, слеживаться, теряя сыпучесть. Уплотняется материал вследствие перераспределения частиц в слое: мелкие частицы под влиянием незначительных вибраций вклиниваются в зазоры между крупными частицами. Это приводит к увеличению площади контакта между частицами и, как следствие, к росту сил адгезии частиц между собой, которую иногда называют аутогезией. Слеживаемость повышается с увеличением влажности воздуха, что объясняется увеличением капиллярной силы адгезии. Некоторые материалы, например порошкообразные удобрения, способны слеживаться в плотные массы. Оценивают степень слеживаемости сыпучих материалов косвенными методами: по сопротивлению вдавливанию в слой материала иглы определенного профиля, по сопротивлению разру-

шению столбика из материала под нагрузкой. В последнем случае степень слеживаемости оценивается величиной разрушающей нагрузки σ_p , приходящейся на единицу площади испытываемого столбика.

2 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСЕЙ

Термин качество смеси сыпучих материалов порой вызывает непонимание. Поэтому будет справедливо использовать характеристику получаемой композиции – однородность смеси. В отличие от материалов одной физико-химической природы для смеси сыпучих материалов однородность характеризуется постоянством составов минимальных объемов, представляющих формирующую смесь. В теоретических работах названный объем – минимальный объем пробы – основной и единственный фактор, анализируемый при оценке качества готовой композиции сыпучих материалов. Выполнение операций по оценке качества смеси (отбор проб, метод анализа) – процесс на который существенно влияют свойства исходных компонентов. Конкретное подтверждение отмеченного: гранулометрический состав и форма частиц изменяют плотность упаковки и частиц в объеме пробы размеры объема необходимого для оценки; динамические характеристики (угол естественного откоса, обрушения, специфические коэффициенты трения покоя и движения) сыпучих материалов определяют подвижность получаемой структуры смеси. Механический отбор проб в этом случае внесет серьезное возмущение, и достоверность заключения о качестве смеси упадет. Для таких структур следует использовать методы оценки качества не нарушающие сформированную смесь (весовые, цветовые, светоотражающие, магнито-, электро-, теплопроводящие методы). Кроме указанных особенностей выбора метода оценки качества смеси сыпучих материалов, следует помнить, что это контролирующая операция технологического процесса и эффективность ее оценивают по стоимости, скорости выполнения и воспроизводимости результатов [19].

2.1 КРИТЕРИИ КАЧЕСТВА СМЕСИ

В результате процесса перемешивания в смесителе происходит взаимное перемещение частиц разных компонентов, находящихся до перемешивания отдельно или в неоднородно внедренном состоянии. В идеализированном процессе мы должны получить такую смесь, когда в любой ее точке к каждой частичке одного из компонентов примыкают частицы других компонентов в количествах, определяемых заданным соотношением компонентов [9]. Так, если смешиваются три компонента, массы которых относятся как целые числа $p : q : m$, то в любом малом объеме, взятом в произвольной точке, массы после идеального смешения тоже должны относиться как $p : q : m$. Однако такое идеализированное расположение частиц в действительности не наблюдается, так как слишком велико число факторов, которые влияют на их взаимные перемещения и от которых в конечном результате зависит степень смешения. Эти факторы можно разделить на три группы:

1) методы смешения (распыливание, пересыпание, перелопачивание, нашлаивание компонентов, смешение компонентов в "кипящем" слое и т.д.;

2) конструктивные особенности смесителей и их режимы работы (степень заполнения, скорость и характер циркуляции материала внутри смесителя, конструкция размешивающего органа, скорость вращения этого органа и т.д.);

3) физико-механические характеристики смеси компонентов (соотношение компонентов, их гранулометрический состав, объемные массы, коэффициент внутреннего трения и т.д.).

В перемешиваемой смеси, в ее микрообъемах возможно бесконечное разнообразие взаимного расположения частиц компонентов. В этих условиях соотношение компонентов в произвольных точках смеси – величина случайная. Повременных методов оценки качества смеси (степени смешивания) основаны на методах статистического анализа. Известно, что наиболее просто статистический материал анализируется по одной случайной величине (законы для систем нескольких случайных величины значительно сложнее, и на практике к ним прибегают только в случае крайней необходимости). Поэтому качество смешивания оценивают по одной случайной величине, смесь условно считают двухкомпонентной. Для этого выделяют из смеси один какой-то компонент, называемый ключевым, а все остальные компоненты объединяют во второй условный компонент. По степени распределения ключевого компо-

нента в массе второго условного компонента и судят о качестве смеси. Таким образом, в двухкомпонентной смеси случайной величиной X является содержание ключевого компонента в ее микрообъемах. Случайная дискретная величина X может быть полностью охарактеризована, если известны: закон ее распределения, математическое ожидание M , дисперсия D или среднее квадратическое отклонение S . Большинство исследователей в качестве основы критерия оценки качества смеси принимают среднее квадратическое отклонение содержания ключевого компонента в пробах, взятых из смеси. Величина среднего квадратического отклонения S по данным опытов подсчитывают по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{m})^2}{n-1}}, \quad (28)$$

где x_i – значение случайной величины X в 1-ом опыте, в нашем случае – содержание ключевого компонента в i -ой пробе; \bar{m} – среднее арифметическое наблюдаемых значений величины X , в нашем случае – среднее арифметическое содержание ключевого компонента во всех пробах; n – общее число отобранных проб.

При большом числе проб величина \bar{m} сходится по вероятности с математическим ожиданием M случайной величины X . Среднее квадратическое отклонение S зависит от величины \bar{m} и имеет ее размерность. Это не позволяет использовать величину S в чистом виде для сравнительной оценки качества смесей с различным содержанием в них ключевого компонента. Поэтому величину S берут в относительной форме, деля ее на некоторую величину S_0 , в которую многие авторы вкладывают разный смысл.

2.2 ВЫБОР НЕОБХОДИМОГО ЧИСЛА ПРОБ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСИ

Всю смесь сыпучих материалов, находящуюся в смесителе, можно условно разбить на A элементарных объемов, в каждом из которых будет свое среднее значение концентрации ключевого компонента c_i . Величина элементарного объема может быть принята равной объему отбираемой пробы. Тогда при наибольшем значении объема пробы величина A будет достигать больших значений. Это дает нам право считать последовательность случайных значений концентрации ключевого компонента в каждом из A элементарных объемов генеральной совокупностью. Генеральная совокупность чисел с нормальным распределением достаточно полно характеризуется их генеральной средней c_r и средним квадратическим отклонением S_r . Из смеси отбирают ограниченное число проб, в результате анализа которых мы получаем n независимых значений величины концентрации c_i ключевого компонента в пробах. Средняя арифметическая из этих значений

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (29)$$

а выборочное среднее квадратическое отклонение

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}. \quad (30)$$

Численность выборки (число отбираемых проб) должна быть такой, чтобы значения \bar{c} и S были близкими по величине соответственно к \bar{c}_r и S_r , ибо только в этом случае смесь будет достаточно точно охарактеризована. При $n \rightarrow \infty$ $\bar{c}_r = \bar{c}$, $S_r = S$, но это требует значительных затрат и практически трудно осуществимо. Необходимая и достаточная численность проб может быть найдена с помощью теоремы Ляпунова, согласно которой вероятность неравенства

$$\frac{\bar{c} - \bar{c}_r}{S\sqrt{n}} < t \quad (31)$$

имеет пределом нормальную функцию распределения, т.е. для сравнительно больших n можно записать

$$P\{|\bar{c} - \bar{c}_r| < t \frac{S}{\sqrt{n}}\} \approx 2\Phi(t) = \alpha, \quad (32)$$

где $\Phi(t)$ – функция Лапласа, значения которой могут быть найдены в таблицах; t – нормированное отклонение. Если принять, что неравенство $(\bar{c} - \bar{c}_r) < \Delta$ выполняется с вероятностью, не меньшей α , то

$$t_\alpha = \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \Delta \quad (33)$$

или

$$n \geq \frac{t_\alpha^2 S^2}{\Delta^2}, \quad (34)$$

в которых t_α найдена по заданной α из уравнения $2\Phi(t) = \alpha$. Формулу (34) можно представить и в другом виде, для чего разделим числитель и знаменатель на \bar{c}^2 и умножим на 100^2

$$n \geq \frac{t_\alpha^2 (S/\bar{c} \cdot 100)}{(\Delta/\bar{c} \cdot 100)^2} = \frac{t_\alpha^2 V_c^2}{\varepsilon^2}, \quad (35)$$

где V_c – коэффициент неоднородности (вариации) смеси, %; ε – относительная предельная погрешность определения \bar{c}_r по \bar{c} , %.

Значение V_c перед опытом обычно неизвестно. Его можно определить предварительным отбором и последующим анализом большого количества проб либо принять равным $V_c = 20$ %, так как в большинстве промышленных смесителей получают смеси сыпучих материалов с качеством не ниже $V_c = 20$ %.

2.3 МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЙ ВЕС ПРОБЫ

Отбираемые на анализ пробы, по которым производится статистическая оценка качества смеси, должны быть представительными, т.е. иметь такой вес, чтобы случайные отклонения в них соотношения компонентов не затушевывали общую картину распределения вещества по объему контролируемой смеси. Чем меньше вес проб, тем точнее может быть охарактеризовано качество смеси. Однако уменьшать вес пробы беспредельно нельзя, даже если мы и будем располагать совершенными методами ее анализа, так как может наступить такой момент, когда избыток или недостаток в пробе одного из компонентов, исчисляемый одной или несколькими его частицами, существенно сказывается на величине c_i , а, в конечном счете, и на величине V_c . Подобная ситуация в микрообъемах смеси всегда должна наблюдаться, так как появление отдельных конкретных частиц компонентов в любой наперед заданной точке объема смесителя в данный момент времени носит случайный характер. При этом величина V_c для разных выборок из одной и той же смеси получает несопоставимые значения, не отражающие истинное распределение частиц по объему смеси. Минимально допустимый вес пробы G_m , т.е. вес, обеспечивающий достоверность оценки качества смеси, вес представительный может быть рассчитан следующим образом. Пусть имеется идеально перемешанная смесь компонентов, состоящая из шаровых частиц одинакового размера и веса. Тогда при заданной концентрации ключевого компонента c_0 минимально допустимый вес пробы

$$G_m = \frac{n_0 \cdot 100}{c_0} \frac{\pi}{6} d^3 \rho, \quad (36)$$

где n_q – число частиц ключевого компонента в пробе минимального веса; d – диаметр частиц, составляющих смесь, см; ρ – плотность материала частиц, г/см³.

Наименьшее отклонение числа частиц ключевого компонента в пробах от теоретического их числа, соответствующего значению c_0 , равно ± 1 шт. Для того чтобы подобные отклонения не изменяли значения c_0 больше, чем на 6 %, минимально допустимый вес пробы должен быть

$$G_m = \frac{100 \cdot 100}{\delta c_0} \frac{\pi}{6} d^3 \rho, \quad (37)$$

так как

$$\frac{n_q - (n_q - 1)}{n_q} \cdot 100 = \delta \% ; \quad n_q = \frac{100}{\delta}. \quad (38)$$

Для реальной смеси при нормальном законе распределения в пробах концентрации ключевого компонента с вероятностью 0,997 можно считать, что максимальная и минимальная концентрации ключевого компонента в пробах будут отличаться на величину не больше, чем ± 35 . Так как нас интересует минимально допустимый вес пробы, а концентрация ключевого компонента входит в знаменатель формулы (37), то для реальной смеси вместо c_0 необходимо подставить верхний предел значений средней концентрации ключевого компонента в пробах, т.е. $(c_0 + 35)$. Тогда

$$G_m = \frac{10^4 \pi}{\delta (c_0 + 35)} d^3 \rho. \quad (39)$$

В реальной смеси размер частиц редко бывает одинаковым, поэтому вместо d следует подставить среднеарифметический диаметр частиц и ключевого компонента. Если же сыпучий материал склонен к комкованию, то вместо d следует подставлять диаметр комка d_k , а вместо ρ – среднеарифметическую насыпную плотность комков ρ_n . Значение δ следует выбрать таким, чтобы изменение числа частиц в пробе на 1 шт. не сказывалось на определяемых анализами значениях c_i , можно принять $\delta = 1,0$ %. Величина S может быть неизвестна для данной контролируемой смеси; ею можно задаться, учитывая, что в большинстве смесителей достигается качество смеси не ниже $V_c = 50$ %. Тогда $S = \frac{V_c c_0}{100} = \frac{1}{2} c_0$. Если теперь подставить принятые значения $\delta = 1,0$ %; $S = 0,5 c_0$, то для неизвестного качества реальной смеси, в которой нет комочков

$$G_m = \frac{10^4 \pi \bar{d}^3 \rho}{c_0 + 1,5 c_0} \approx \frac{1,26 \cdot 10^4 \bar{d}^3 \rho}{c_0}, \quad (40)$$

а для комкающихся сыпучих материалов

$$G_m \approx \frac{1,26 \cdot 10^4 \bar{d}_k^3 \bar{\rho}_n}{c_0}. \quad (41)$$

При назначении практического веса проб G во избежание ошибок необходимо соблюдать условие $G \geq G_m$. Минимально допустимый вес проб для тонкодисперсных материалов имеет весьма небольшую величину. Поэтому для них допустимый вес проб следует определять с учетом необходимой точности их анализа и погрешностей измерительной аппаратуры. Большинство исследователей для определения качества смеси порошкообразных материалов брали пробы весом 0,2...6 г, что вызывалось определен-

ными условиями их анализа. Для материалов с диаметром частиц $d > 1$ мм проверка назначенного веса проб G на условие $G \geq G_m$ обязательна.

2.4 ПОВЕРОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ СМЕСИ

При эксплуатации промышленных смесителей, прошедшие в свое время испытания, нет необходимости каждую партию смешанных в них продуктов подвергать полному статистическому анализу с отбором

40 – 50 проб. В этом случае можно использовать метод последовательного анализа, разработанный А. Вальдом и заключающийся в следующем. Пусть по данным предварительных испытаний смесителя было установлено, что при рабочем его режиме величина среднего квадратического отклонения концентрации ключевого компонента в пробах готовой смеси равна S . Можно принять, что величина концентрации ключевого компонента в пробах смеси c_i распределена нормально. По техническим условиям на качественную смесь значение средней концентрации \bar{c} ключевого компонента в ней должно лежать в пределах $c_1 - c_2$. Рассмотрим сначала гипотезы того, что действительная средняя концентрация \bar{c} ключевого компонента в контролируемой партии смеси меньше или больше c_2 . Если величина $\bar{c} = c_2$, то партия смеси может быть принята или забракована. Установим, что если значение \bar{c} в контролируемой партии превысит верхний допустимый предел c_2 на величину Δ_c , то партия бракуется, и, наоборот, если \bar{c} меньше c_2 , на величину Δ_c , то партия принимается. Величина Δ_c должна быть заранее оговорена регламентом. По итогам первых анализов проб мы должны принять две гипотезы: 1) $\bar{c} \leq c_2 - \Delta_c = c_{2н}$ и 2) $\bar{c} \geq c_2 + \Delta_c = c_{2в}$. Обозначим вероятность принятия первой гипотезы, когда в действительности имеет место гипотеза вторая, через α , а вероятность принятия второй гипотезы, когда в действительности имеет место первая гипотеза, через β . Предположим, что произведенная выборка из контролируемой партии численностью n проб дала следующие значения концентрации ключевого компонента в пробах: $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$. Плотность вероятности этой выборки

$$\rho_n = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2S^2} \sum_{i=1}^n (c_i - c_{2н})^2 \right] \quad (42)$$

при условии, что $\bar{c} = c_{2н}$, и

$$\rho_n = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2S^2} \sum_{i=1}^n (c_i - c_{2в})^2 \right]. \quad (43)$$

При условии, что $\bar{c} = c_{2н}$ А. Вальдом установлено, что если отношение $\rho_n / \rho_n \leq B$, то контролируемая партия может быть принята по качеству, а если $\rho_n / \rho_n \geq A$, то отклонена. Условие продолжения анализов определяется неравенством

$$B < \rho_n / \rho_n < A, \quad (44)$$

где $A = \frac{1-\beta}{\alpha}$ и $B = \frac{\beta}{1-\alpha}$.

После логарифмирования и упрощений неравенство для верхнего предела c_2 может быть записано в следующем виде

$$B_2 + b_2 n < \sum_{i=1}^n c_i < A_2 + b_2 n, \quad (45)$$

где n – общее число анализированных проб из контролируемой партии к моменту принятия решения о продолжении или прекращении анализов; $\sum_{i=1}^n c_i$ – суммарное значение концентрации ключевого компонента в анализированных пробах из контролируемой партии смеси; b_2 ; A_2 ; B_2 – числа, подсчитываемые по исходным данным из выражений:

$$A_2 = 2,3 \frac{S^2}{c_{2B} - c_{2H}} \lg \frac{1-\beta}{\alpha}; \quad (46)$$

$$B_2 = 2,3 \frac{S^2}{c_{2B} - c_{2H}} \lg \frac{\beta}{1-\alpha}; \quad b_2 = \frac{c_{2B} + b_{2H}}{2}. \quad (47)$$

Величину $(B_2 + b_2 n) = a_n$ называют приемочным числом, а величину $(A_2 + b_2 n) = r_n$ – браковочным. Проверку качества контролируемой смеси продолжают до тех пор, пока $\sum_{i=1}^n c_i$ не превысит чисел a_n или r_n . При этом, если $\sum_{i=1}^n c_i \geq r_n$, то партию смеси бракуют, а если $\sum_{i=1}^n c_i \leq a_n$, то смесь считают качественной.

Если же очередной анализ даст точку, которая окажется за пределами этой полосы, то анализы надо прекращать. При этом вся партия смеси бракуется, если точка окажется выше линии 2, и, наоборот, принимается по верхнему пределу c_2 , если точка окажется ниже линии 1. Последнему случаю соответствует точка c_6 . Подобные выкладки можно проделать и с нижним пределом допустимой концентрации c_1 в контролируемой партии, хотя необходимости в этом нет, так как при установленном значении S для рабочего режима работы смесителя разброс C_i , относительно \bar{c} будет симметричен. Как показали расчеты, использование метода последовательного анализа позволяет сократить число необходимых анализов не менее чем на 47 % по сравнению с тем их числом, которое получают при расчетах по обычным статистическим формулам.

2.5 ТЕХНИКА ОТБОРА ПРОБ ИЗ СМЕСИ

Для оценки качества смеси, получаемой в смесительных аппаратах периодического действия, используют в основном два метода отбора проб. При первом методе, часто называемом методом квартования, всю приготовленную в смесителе композицию выгружают на противень, распределяют на нем ровным слоем небольшой высоты, затем всю площадь исследуемой массы делят полосками на 20 – 50 квадратов, из которых и отбирают пробы. Для повышения точности анализов иногда берут из каждого квадрата по три-четыре пробы и результаты их анализа усредняют. Для сокращения времени приготовления навесок пробы смеси обычно отбирают с помощью черпачка с заранее выбранным объемом, примерно равным объему навески. Этот метод не позволяет выявить мертвые зоны в смесителе, требует после каждого исследуемого режима работы выгрузки материала, что нарушает действительную картину распределения вещества в объеме смесителя. По этим причинам метод квартования используют в основном для поверочных анализов новых композиций, приготовляемых в промышленных смесителях известной конструкции. Второй метод, так называемый метод точечного отбора, широко используют для изучения кинетики процесса смешения в смесителях. Он заключается в следующем. В корпусе исследуемого смесителя рассверливают отверстия, прикрываемые во время работы смесителя пробками. После останова смесителя через эти отверстия внутрь смесителя вводят специальный пробоотборник. Число отверстий в корпусе смесителя должно быть таким, чтобы можно было взять пробы практически из

любой зоны внутреннего объема смеси. Конструкция пробоотборника должна позволять, во-первых, легко вводить его в сыпучий материал по возможности без нарушения структуры смеси, во-вторых, отобрать сразу несколько проб из разных мест смесителя, не позволяя им перемешаться между собой. Наиболее соответствует этим требованиям конструкция пробоотборника, изображенная на рис. 5. В трубу 1 с коническим наконечником и окнами по длине плотно вставляется труба 2, разделенная внутренними перегородками 3 на ряд камер 4. Каждая камера имеет окно, которое по размерам и расположению совпадает с соответствующим отверстием в трубе 1. При повороте внутренней трубы 2 с помощью рычага 5 отверстия в ней могут совпадать с отверстиями в наружной трубе или перекрываться ее стенками. Положения "Камеры открыты" и "Камеры закрыты" фиксируются штырем 6, ввернутым в стенку внутренней трубы и движущимся в пазу наружной трубы. При введении пробоотборника в смесь камеры внутренней трубы закрыты. После фиксации глубины введения пробоотборника камеры открываются, в них самотеком засыпается смесь, затем камеры закрываются и пробоотборник вынимается. Смесь каждой камеры составляет одну пробу.

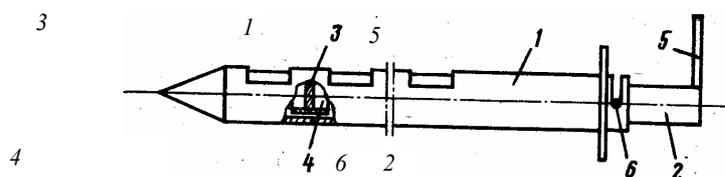


Рис. 5 Конструкция трубчатого пробоотборника

Конструкция подобного пробоотборника, широко используемого исследователями, позволяет одновременно отобрать сразу от 4 до 20 проб. При исследованиях процесса смешения внутри смесителей непрерывного действия также используется метод точечного отбора. Для этого смеситель останавливают через определенные промежутки времени и с помощью пробоотборника через отверстия в корпусе смесителя отбирают для анализа необходимое число проб. Пробы из потока материала на выходе из смесителя непрерывного действия должны отбираться через равные и сравнительно короткие промежутки времени. Поэтому исследователи часто используют для этих целей протяжный механизм. Этот механизм состоит из цепного транспортера, приводимого в движение с помощью электродвигателя через понижающий редуктор, закрепляемых на нем приемных коробок, сварной станины с поддоном. Расстояние между приемными коробками должно быть выбрано с учетом скорости протяжки транспортера и необходимым промежутком времени между отборами проб. Размеры приемных коробок увязывают с шириной потока материала, выходящего из смесителя, объемной производительностью смесителя и объемом отбираемых проб. Длину транспортера назначают исходя из необходимого числа проб одной реализации случайного процесса и скорости протяжки. Если скорость протяжки меньше 2 м/мин, то транспортер выбирают небольшой длины, а приемные коробки устанавливают вручную в специальные гнезда цепи на начальном участке транспортера. После прохода коробок зоны их засыпки они снимаются. Таким образом, при ограниченной длине транспортера можно заполнить материалом любое количество приемных коробок. При больших скоростях протяжки подобных манипуляций с коробками сделать не удастся. В этом случае длина транспортера должна быть такой, чтобы все заполненные за одну реализацию приемные коробки разместились на верхней ветви транспортера. Для текущего контроля качества смешения сыпучих материалов в смесителях непрерывного действия конструируют специальные пробоотборники, устанавливаемые на отводящих трубопроводах.

2.6 МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОБ

Все существующие методы количественного анализа проб смеси сыпучих материалов на содержание в них ключевого компонента можно условно разбить на две группы. Методы первой группы разработаны для непосредственного количественного анализа компонентов пробы смеси без предваритель-

ного ее растворения. К ним относятся в основном гравиметрические методы. Другие методы этой группы (радиометрические, фотографические, кондуктометрические и пр.) используются редко, так как дают большие погрешности. Во вторую группу объединены методы, которые требуют предварительного растворения пробы смеси в соответствующей жидкости. К этой группе относятся химические, кондуктометрические, потенциометрические, оптические, гравиметрические и некоторые другие методы анализа растворов. Методы первой группы исследователями используются сравнительно редко, так как они применимы к сугубо специфичным смесям.

Гравиметрические методы. Гравиметрические методы первой группы заключаются в разделении пробы смеси сыпучих материалов на составляющие компоненты и последующем их взвешивании. Если частицы смеси имеют сравнительно большие размеры (больше 2 мм) и их принадлежность к тому или иному компоненту можно определить по внешним признакам (цвету, форме), то пробу можно разделить вручную. Значительно сложнее разделить на компоненты пробу смеси мелкодисперсных материалов. Из известных способов разделения сыпучих материалов используют рассев на ситах, разделение в магнитном поле или в воздушных сепараторах. Рассев на ситах применяют тогда, когда частицы ключевого компонента составляют фракцию, в которую не попадают частицы других компонентов. Для анализа проб небольшого веса этот способ разделения компонентов практически не годится. Второй способ разделения используют, когда один из компонентов смеси имеет магнитные свойства. Пробу смеси, содержащую, например, железный и цинковый порошки, помещают на бумажную подложку и вместе с ней взвешивают. Затем прикрывают ее сверху другим тонким листком бумаги. К верхнему листку подносят включенный электромагнит, который вместе с верхним листком производит легкие "размазывающие" пробу движения. После этого электромагнит вместе с верхним листком и приставшим к нему магнитным материалом (железным порошком) переворачивают. Электромагнит выключают, снимают с него верхний листок с магнитным материалом и взвешивают нижний листок с цинковым порошком и верхний с железным порошком. По результатам взвешивания рассчитывают содержание компонентов в пробе. Разделение пробы смеси на компоненты в воздушных сепараторах используют в том случае, когда один из компонентов состоит из частиц, значительно отличающихся по весу от частиц других компонентов: в основном для зернистого материала. Гравиметрические методы второй группы заключаются в растворении пробы смеси в соответствующей жидкости и последующем определении веса компонента, перешедшего в раствор, и остатка. Методы эти трудоемки, так как включают в себя операции растворения, фильтрации, высушивания, взвешивания и отличаются малой точностью.

Химические методы. Среди химических методов анализа растворов наибольшее распространение получил метод титрования. При этом методе специально подобранный реагент (титрант) избирательно реагирует с ключевым компонентом, находящимся в растворе, по схеме



где A – ключевой компонент; B – реагент (титрант); C и D – продукты реакции.

Анализ проб на содержание в них ключевого компонента методом титрования выполняют в следующем порядке. Из проб смеси берут определенные навески, величина которых зависит от природы ключевого компонента, процентного его содержания в смеси, точности анализа и т.п. Навески растворяют в отдельных колбах в соответствующем количестве растворителя. Если в смеси находятся компоненты, не растворяющиеся в данном растворителе, то раствор фильтруют. Из каждой колбы отбирают заранее установленный объем отфильтрованного раствора, помещают его в специальную колбу и подвергают титрованию. При этом в колбу постепенно добавляют титрант или его раствор до тех пор, пока количество веществ A и B в смеси не достигнет эквивалентного соотношения в соответствии со стехиометрическим уравнением реакции. Этот момент, называемый конечной точкой титрования, определяется по косвенным признакам: по изменению цвета добавленного в раствор индикатора, выпадению осадка. По количеству пошедшего на титрование титранта можно рассчитать процентное содержание ключевого компонента в пробе. Если титрант – жидкость или он находится в растворе, то объем титранта, израсходованного на титрование пробы, определяют по изменению уровня в бюретке, из которой он выпускается на анализ через капельницу. Этот объем иногда называют спуском. Относительная ошибка определения концентрации ключевого компонента в пробах объемным химическим анализом [5]

$$\frac{S}{c_i} = \sqrt{\left(\frac{S_e}{e}\right)^2 + \left(\frac{S_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{S_T}{T}\right)^2 + \left(\frac{S_F}{F}\right)^2 + \left(\frac{S_A}{A}\right)^2}, \quad (49)$$

где S , S_e , S_V , S_T , S_F , S_A – средняя квадратическая ошибка определения соответственно концентрации ключевого компонента в пробе, веса пробы, объема фильтрата, отбираемого на титрование, титра раствора реагента, объема спуска, объема жидкости, пошедшей на растворение всей навески; c_i – концентрация ключевого компонента в пробе; e – вес навески пробы; V – объем фильтрата, отбираемого на титрование; T – титр раствора реагента; F – объем раствора, пошедший на титрование фильтрата; A – объем жидкости, в которой растворена навеска пробы.

Величины S_V , S_F , S_A зависят от емкости мерной посуды. Их значения могут быть выбраны по табл. 3. Относительная ошибка в определении титра не должна превышать 0,001. Относительная ошибка S_e / e зависит от типа используемых весов и величины навески. При взвешивании на аналитических весах величина S_e не превышает 0,0002 г. Наиболее существенными являются ошибки отмера объема фильтрата S_V и объема раствора реагента S_F , пошедшего на титрование. Поэтому, на титрование идут небольшие количества раствора реагента, S_e .

Кондуктометрические методы. Кондуктометрический метод определения концентрации растворенного в воде вещества (электролита) основан на способности таких растворов проводить электрический ток. Эта способность характеризуется величиной электропроводности зависящей от концентрации и природы растворенного вещества. Электропроводность обратна сопротивлению R той части раствора, которая заключена между электродами. Для величины R в этом случае предлагается следующая зависимость

$$R = \frac{l}{\nu F}, \quad \text{Ом}, \quad (50)$$

где l – расстояние между электродами, см; F – площадь электродов, см²; ν – удельная электропроводность (электропроводность раствора, заключенного между электродами площадью 1 см² при расстоянии между электродами 1 см), 1/Ом·см.

Отношение l/F является постоянной прибора. Ее значение находят измерением сопротивления эталонного раствора с известной величиной удельной электропроводности. Уравнение (57) позволяет по измеренному значению R найти величину ν , по которой, в свою очередь, используя закон Кольрауша, можно рассчитать концентрацию анализируемого раствора c_p . Для массовых анализов растворов, содержащих одни и те же растворенные вещества, часто строят калибровочную кривую зависимости удельной электропроводности раствора от концентрации в нем ключевого компонента $\nu = f(c_p)$. Эту зависимость находят измерением величины V растворов с известной концентрацией c_p . Удельная электропроводность растворов электролитов зависит от температуры, поэтому всю кривую $\nu = f(c_p)$ снимают при одной и той же температуре раствора t_n . Кроме того, надо учитывать, что калибровочная кривая действительна только для той измерительной ячейки (датчика) прибора, на которой она снята. С увеличением концентрации раствора величина ν сначала резко возрастает от нулевого значения, достигает максимума, а затем плавно убывает. Точность определения c_p по калибровочной кривой справа от максимума низкая, поэтому кривую используют только в восходящей части, т.е. слева от максимума. Калибровочная кривая позволяет по измеренной на кондуктометрическом приборе величине ν найти соответствующее ей значение концентрации вещества c_p в растворе. Кондуктометрический метод определения концентрации ключевого компонента в растворе неприменим, если при растворении в воде исследуемой навески смеси сыпучих материалов в растворе окажутся вещества с приблизительно одинаковой подвижностью ионов, что бывает не так уже редко. В современных кондуктометрических концентратомерах используются в основном уравновешенная и неуравновешенная мостовые измерительные системы. Так как удельная электропроводность зависит от температуры, концентратометры снабжаются специальными устройствами, автоматически устраняющими это влияние на результаты измерений.

3 СВОЙСТВА СМЕСЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс смесеприготовления композиции сыпучих материалов, а также передача готового полу-продукта на последующие технологические операции (дозирование, транспортирование) используют перемещение масс в виде потоков исходных компонентов и полученной смеси. Основным требованием при организации и проведении названных операций является создание динамических условий (плотности потоков, скоростных характеристик и т.д.) исключающих развитие сегрегации, приводящей к нарушению структуры смеси и как следствие – ухудшению ее однородности. Названное заставляет, на стадии проектирования процесса, иметь надежную информацию о коэффициентах трения не только исходных компонентов, но и полученной их композиции. Смесь сыпучих материалов имеет склонность к нарушению структуры под действием силовых факторов, необходимых для организации транспортных потоков, что значительно усложняет методику определения значений коэффициентов трения смеси и требует новой опытной базы в сравнении с ситуацией определения этих характеристик для отдельных сыпучих материалов. Строгий подход к нахождению названных характеристик отдельных компонентов, входящих в состав смеси, из-за различия в гранулометрическом составе, заставит и для сыпучих материалов одной химической природы использовать методику определения и лабораторную базу как для смеси.

Специфика процесса смешивания и многообразие композиций, получаемых в результате, привело к обилию работ по вопросам исследования смесительного оборудования. Отсутствие унифицированных надежных методов расчета, как процесса, так и смесителей для сыпучих материалов вызывает у проектировщиков затруднения в разработке эффективных во всех отношениях конструкций. В настоящей главе дана попытка создания подходов в решении названной задачи, исключающих в значительной степени ошибки в практике общения со смесительным оборудованием для дискретных твердотельных композиций. Используя системный подход, рассмотрим ряд задач и путей их решения, влияющих на эффективность разрабатываемых конструкций смесителей. Основными критериями являются: физическая ясность происходящего, простота конструкции смесителя, оптимальность затрат при формировании смеси сыпучих материалов с заданным уровнем качества.

3.1 Случайность в свойствах исходных и конечных продуктов процессов смешивания

ПРОЦЕСС СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ – ПРОЦЕСС МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДО ОБРАЗОВАНИЯ ОДНОРОДНОЙ КОМПОЗИЦИИ [13]. ДОСТИЖЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ – МЕХАНИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛОВОГО ИСТОЧНИКА АППАРАТА В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА СО ВСТРЕЧНЫМИ И НЕПОДВИЖНЫМИ ЧАСТИЦАМИ.

ЗАДАЧА ПРОСТА: ПРИ ИЗВЕСТНОЙ СИЛОВОЙ КАРТИНЕ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ МОЖНО УСТАНОВИТЬ И ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ, И ТРАЕКТОРИЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ МИКРООБЪЕМОВ КОМПОНЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ СМЕШИВАНИЯ. ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ "МОДЕЛЬНЫХ" ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ, Т.Е. МАТЕРИАЛОВ С ПОСТОЯННЫМИ СВОЙСТВАМИ, ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ НА ОРГАНИЗАЦИЮ КОМПОЗИЦИИ ФИЗИЧЕСКИ ЯСНА, ПРОСТА С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ.

СЛОЖНОСТЬ ЭТОГО ПОДХОДА ПРИ АНАЛИЗЕ ДВИЖЕНИЯ КАЖДОЙ ОТДЕЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ КОМПОЗИЦИИ – БОЛЬШОЕ ЧИСЛО ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ДЕЙСТВИЙ. В ЭТОЙ СИТУАЦИИ СОЗДАВАЕМОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ОДНОЗНАЧНО ХАРАКТЕРИЗУЕТ ПОЛУЧАЕМУЮ ОДНОРОДНОСТЬ СМЕСИ.

ПЕРЕХОД ОТ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ К РЕАЛЬНЫМ СЫПУЧИМ, ДЛЯ КОТОРЫХ ПОСТОЯННЫ ЛИШЬ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ИЛИ ПРИРОДА, ПРИВОДИТ К РАЗБРОСУ В

КОЛИЧЕСТВЕННОМ ПРОЯВЛЕНИИ ВЛИЯНИЯ ВАЖНОГО В ЭТОМ СЛУЧАЕ СВОЙСТВА НА ХАРАКТЕР И ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ. ИСХОДЯ ИЗ ЭТОЙ СИТУАЦИИ, БОЛЬШИНСТВО ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ ПРЕДЛАГАЮТ ЭМПИРИЧЕСКИЙ ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ОТ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ. ДОСТИГАЯ ПРИ ЭТОМ УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНОЙ СХОДИМОСТИ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН, АВТОРЫ УСЛОЖНЯЮТ, А ПОРОЙ ПОЛНОСТЬЮ СКРЫВАЮТ КОЛИЧЕСТВЕННУЮ КАРТИНУ ФИЗИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ.

ПРИЧИНА НЕУДАЧ ПЕРЕНОСА ПОЛУЧЕННЫХ НА МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА РЕАЛЬНЫЕ КРОЕТСЯ ЧАСТО НЕ В ОШИБКЕ ПРИНЯТОГО АВТОРОМ ОПИСАНИЯ, А В ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНОГО СВОЙСТВА В НЕКОТОРОМ ДИАПАЗОНЕ. ОШИБКИ В РАСЧЕТАХ ЛЕГКО ОБЪЯСНИТЬ, ПРОАНАЛИЗИРОВАВ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА ОТ ЧИСЛЕННОГО ПРОЯВЛЕНИЯ АНАЛИЗИРУЕМОГО СВОЙСТВА С УЧЕТОМ СРЕДНЕГО ЗНАЧЕНИЯ И ЗОНЫ ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛА [21].

ОСТАНОВИМСЯ ПОДРОБНЕЕ НА ЭТОМ ВОПРОСЕ. ДОПУСТИМ, ЗНАЧЕНИЕ ПАРАМЕТРА, ХАРАКТЕРИЗУЮЩЕГО СВОЙСТВО МАТЕРИАЛА – P ; ВОЗМОЖНОЕ ОТКЛОНЕНИЕ ЕГО – ΔP . В ПРОЦЕССЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВЛЕНА ЗАВИСИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКА – T ОТ ЭТОГО ПАРАМЕТРА, ЛИНЕЙНАЯ И СТЕПЕННАЯ. ВЫПОЛНИВ РАСЧЕТ, ПОЛУЧИМ СЛЕДУЮЩИЕ ВЫРАЖЕНИЯ:

$$T = P \text{ С ЗОНОЙ РАССЕЯНИЯ } \Delta T = \Delta P; T' = P^n \text{ С ЗОНОЙ РАССЕЯНИЯ } \Delta T = \Delta P^n .$$

ПРИ ПОКАЗАТЕЛЕ СТЕПЕНИ БОЛЬШЕ ЕДИНИЦЫ ВОЗМОЖНО ПОЛУЧИТЬ ОШИБКУ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ПОТОКА В СОТНИ ПРОЦЕНТОВ.

ВЫХОД ИЗ ТАКОЙ СИТУАЦИИ ВОЗМОЖЕН ПРИ УТОЧНЕНИИ ТЕРМИНА "СЫПУЧИЙ МАТЕРИАЛ" ДО ОБЯЗАТЕЛЬНОГО ПОСТОЯНСТВА В СВОЙСТВАХ И ПРИНЯТИИ РЕАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОДНОЙ ПРИРОДЫ, С КОЛЕБАНИЯМИ, ВАЖНОГО В РАССМАТРИВАЕМЫЙ МОМЕНТ СВОЙСТВА КАК КОМПОЗИЦИИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИК ОПИСАНИЯ, ВЫВЕДЕННЫХ ДЛЯ СМЕСИ. СЛЕДУЕТ ОТМЕТИТЬ, ЧТО НА НАСТОЯЩИЙ ДЕНЬ РАБОТ ПО ОЦЕНКЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОТОКОВ СМЕСЕЙ С ФИЗИЧЕСКИ ЯСНЫМИ МЕТОДИКАМИ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТА НЕТ. ОБЪЯСНЕНИЕ ЭТОГО – В ДИНАМИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СТРУКТУРЫ СМЕСИ И, КАК СЛЕДСТВИЕ, НЕСТАБИЛЬНОСТИ СВОЙСТВ.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ДЛЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ, СЛЕДУЕТ НАПРАВИТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ, В ПЕРВУЮ ОЧЕРЕДЬ, НА КОНКРЕТИЗАЦИЮ "СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА" КАК ВИДА МАТЕРИИ, С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОСТОЯНСТВА ХИМИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, КАКИМИ ОБЛАДАЕТ КОЛЛЕКТИВ ТВЕРДЫХ, НЕДЕФОРМИРУЕМЫХ ЧАСТИЦ ОДНОГО МАТЕРИАЛА СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ОДИНАКОВОГО РАЗМЕРА, С ПОСТОЯННОЙ МИКРОНЕРОВНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТИ. ВО-ВТОРЫХ, СЛЕДУЕТ ВЫПОЛНЯТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОЗДАВАТЬ МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ПОТОКОВ СМЕСЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СОСТАВОВ.

НАЗВАННЫЕ ЗАДАЧИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ХАРАКТЕРА, ПРИЧЕМ СЛЕДУЕТ ПРЕДУПРЕДИТЬ, ЧТО ПОСТЕПЕННОЕ РЕШЕНИЕ ИХ НЕ ВСЕГДА, НА ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТАДИЯХ, БУДЕТ ДАВАТЬ ПРАКТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ. БЕЗ ЭТИХ РАБОТ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЦЕССОВ (МЕХАНИЧЕСКИХ) ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ БУДУТ ВЕРОЯТНОСТНЫМИ.

ТЕСНО СВЯЗАНО С РАССМОТРЕННОЙ ПРИЧИНОЙ НЕУДАЧ В ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ С СЫПУЧИМИ МАТЕРИАЛАМИ ОТСУТСТВИЕ НОРМАТИВОВ, ОГРАНИЧИВАЮЩИХ ИХ СВОЙСТВА, МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСЛЕДНИХ И ПРИБОРНУЮ БАЗУ. ПОЯСНИТЬ МОЖНО ПРИМЕРОМ ИЗ ПЕРВОЙ ГЛАВЫ. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СВОЙСТВА СЫПУЧЕЙ ФАЗЫ ЗАВИСЯТ ОТ УСЛОВИЙ, В КОТОРЫХ ИХ АНАЛИЗИРУЮТ. СРЕДИ СВОЙСТВ ВЫДЕЛЯЮТ ПЛОТНОСТЬ И ВЛАЖНОСТЬ, ХОТЯ ПЛОТНОСТЬ ЗАВИСИТ ОТ ВЛАЖНОСТИ, ВЛАЖНОСТЬ ОТ СПОСОБНОСТИ АДГЕЗИИ МАТЕРИАЛА, ЕГО ПОРИСТОСТИ И Т.Д. ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ СЛЕДУЕТ ОПРЕДЕЛИТЬ ОСНОВНЫЕ И ДАТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ИХ ОТ ВТОРОСТЕПЕННЫХ. НЕ СЕКРЕТ,

ЧТО ПОДВИЖНОСТЬ НЕСВЯЗАННЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ЗАВИСИТ ОТ РАЗМЕРОВ ОБЪЕМА, ПОДЛЕЖАЩЕГО АНАЛИЗУ, – СКАЗЫВАЕТСЯ ЭФФЕКТ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА. РАЗЛИЧИЕ В РАЗМЕРАХ ПРИБОРОВ ОДНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИВОДИТ К ЗНАЧИТЕЛЬНЫМ РАЗБРОСАМ В ЗНАЧЕНИЯХ ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА. СКАЗАННОЕ О НЕОБХОДИМОСТИ БОЛЕЕ КОНКРЕТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМИНОВ И ПРИБОРНОЙ БАЗЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ИЛЛЮСТРИРУЕТ РАБОТА [20].

ТАКИМ ОБРАЗОМ, НА СТАДИИ НАЧАЛА ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ПРОЕКТИРОВЩИКУ ИЗВЕСТНЫ В НЕКОТОРОЙ СТЕПЕНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ, СЛОЖНЕЕ ОБСТОИТ ДЕЛО С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ СВОЙСТВ ГОТОВОЙ СМЕСИ. ЛЮБЫЕ СИЛОВЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИБОРА НАРУШАЮТ СТРУКТУРУ СМЕСИ. ФИКСАЦИЮ СТРУКТУРЫ ЗАМОРАЖИВАНИЕМ ИЛИ ПО МЕТОДУ [3, 4] ВОЗМОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК (ПЛОТНОСТЬ, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ И Т.Д.) ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА (УГЛЫ ТРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ, ПОКОЯ, ОБРУШЕНИЯ, ЕСТЕСТВЕННОГО ОТКОСА) ОПРЕДЕЛИТЬ ДЛЯ КОМПОЗИЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ДОСТАТОЧНО ТРУДНО, И ПОЛУЧАЕМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕ ВСЕГДА ДОСТОВЕРНЫ.

Попыткой нахождения характеристик смеси можно назвать работу [3]. Предполагаемая конструкция прибора по этому способу определения коэффициента внутреннего трения позволяет находить значения динамических свойств сыпучих компонентов и их композиций, фиксируя структуру смеси наличием ячеек в конструкции прибора.

ТАКИМ ОБРАЗОМ, ПРОЕКТИРОВЩИК ИМЕЕТ ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧИТЬ ИНФОРМАЦИЮ НЕ ТОЛЬКО О СВОЙСТВАХ ИСХОДНЫХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ, НО И ИХ КОМПОЗИЦИИ. ВПОЛНЕ ЛОГИЧНО, ЧТО В ПРОЦЕССЕ СМЕШИВАНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ СВОЙСТВ СМЕСИ МЕНЯЕТСЯ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ИСХОДНЫХ ДО ВЕЛИЧИН, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ТРЕБУЕМОЙ СТРУКТУРОЙ ГОТОВОЙ КОМПОЗИЦИИ. ТАК, ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПОТОКА СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ, ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ ЗАВИСЯТ ОТ СИЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МАСС. РЕАКЦИИ РАССМАТРИВАЕМОГО МИКРООБЪЕМА НА СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОТОКА ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ЧЕРЕЗ КОЭФФИЦИЕНТЫ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ (А ТОЧНЕЕ, КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ) МАТЕРИАЛОВ, ОБРАЗУЮЩИХ СМЕСЬ, И САМОЙ СМЕСИ. ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ЭТИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИДЕАЛЬНОЙ РЕГУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ, ПО АНАЛОГИИ С ТЕОРИЕЙ ОБОБЩЕННОЙ ПРОВОДИМОСТИ, ПРИНИМАЕМ, ЧТО ПАРАМЕТР (ПЛОТНОСТЬ, ЦВЕТ, ЭЛЕКТРО-, ТЕПЛО-, МАГНИТОПРОНИЦАЕМОСТЬ И Т.Д.) ЗАВИСИТ ОТ ЗНАЧЕНИЙ ЭТИХ ПАРАМЕТРОВ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ И ОБЪЕМНОГО СОСТАВА СМЕСИ.

ПОДРОБНЕЕ ОСТАНОВИМСЯ НА ОПРЕДЕЛЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ. ПУСТЬ СМЕСЬ ОБРАЗУЕТСЯ ИЗ N – КОМПОНЕНТОВ, СООТНОШЕНИЕ КОТОРЫХ В КОМПОЗИЦИИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ – c_{v_i} . ТОГДА ПРИ ОЦЕНКЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПО НЕКОТОРОЙ ПЛОСКОСТИ МОЖНО УСТАНОВИТЬ, ЧТО КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ СМЕСИ – $F_{см}$ БУДЕТ РАВЕН $f_{см} = f_1 \frac{S_1}{\sum S_i} + f_2 \frac{S_2}{\sum S_i} + \dots + f_n \frac{S_n}{\sum S_i}$, ГДЕ S_I – ПЛОЩАДЬ КОНТАКТА I -ГО КОМПОНЕНТА С РАССМАТРИВАЕМОЙ ПЛОСКОСТЬЮ; $\sum S_I$ – ПЛОЩАДЬ СЕЧЕНИЯ, ОБЪЕМА СМЕСИ В РАССМАТРИВАЕМОЙ ПЛОСКОСТИ.

ВЫРАЗИВ ОТНОШЕНИЕ ПЛОЩАДЕЙ КОНТАКТА ЧЕРЕЗ ОБЪЕМНУЮ КОНЦЕНТРАЦИЮ, ПОЛУЧИМ: $f_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} f_i c_{v_i}$, ГДЕ F_I – КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ I -ГО КОМПОНЕНТА СМЕСИ.

Аналогичный подход в теоретическом определении воздействия свойств системы на ее поведение возможно использовать и для других проявлений влияния состава композиции на ее свойства.

3.2 Определение свойств смеси сыпучих материалов

ОБЪЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАНА ПОЗВОЛЯЕТ СДЕЛАТЬ ВЫВОД О ПРАКТИЧЕСКИ ПОЛНОМ ОТСУТСТВИИ МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ. ОБЪЯСНЕНИЕ ЭТОМУ СКРЫТО В ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОДВИЖНОСТИ АНАЛИЗИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ ДИСКРЕТНЫХ ТВЕРДЫХ ФАЗ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ СВОЙСТВ ОТДЕЛЬНЫХ СЫПУЧИХ КОМПОНЕНТОВ, ДЛЯ ИХ СМЕСЕЙ, ТРЕБУЕТ ВВЕДЕНИЯ МЕР ПО ФИКСИРОВАНИЮ СТРУКТУРЫ. С ЭТОЙ ЦЕЛЮ НАСТОЯЩАЯ РАБОТА РЕКОМЕНДУЕТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ ПРИМЕНЯТЬ МЕТОДИКУ И УСТАНОВКУ [3] (РИС. 6). В ОТЛИЧИЕ ОТ ТРИВИАЛЬНОГО СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ [2], ПРИБОР ПО РЕКОМЕНДУЕМОЙ МЕТОДИКЕ В ПОДВИЖНОЙ 2 И НЕПОДВИЖНОЙ 3 СЕКЦИЯХ (РИС. 6) ИМЕЕТ ПЕРЕГОРОДКИ 1, ОБРАЗУЮЩИЕ ЯЧЕЙКИ. ВВЕДЕНИЕ ЭТИХ ЭЛЕМЕНТОВ ФИКСИРУЕТ СТРУКТУРУ СМЕСИ И ПОЗВОЛЯЕТ ОПРЕДЕЛЯТЬ ЕЕ СВОЙСТВА ПО МЕТОДИКАМ, ПРИМЕНЯЕМЫМ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ "ЧИСТЫХ" СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ.

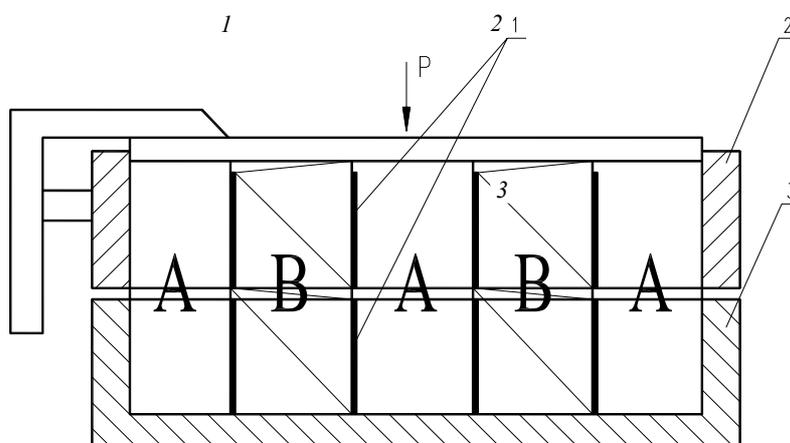
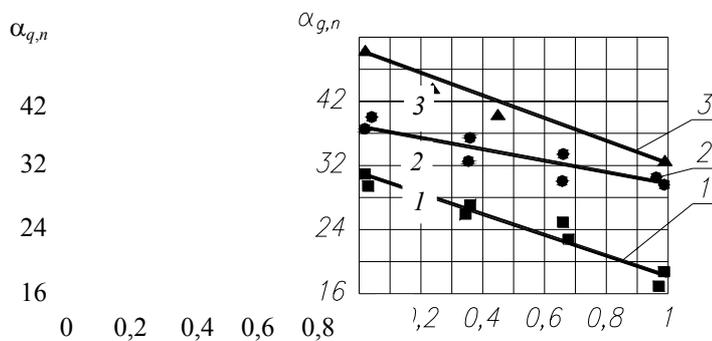


РИС. 6 УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ СМЕСИ НА ПЕРВОЙ СТАДИИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ ОПРЕДЕЛЯЛИСЬ УГЛЫ ТРЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ, ОБРАЗУЮЩИХ СМЕСИ. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИВЕДЕНЫ В ТАБЛ. 1.

ТАБЛИЦА 1

ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ИСХОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ, ВЫРАЖЕННЫЕ ДЛЯ НАГЛЯДНОСТИ ЧЕРЕЗ УГЛЫ

МАТЕРИАЛ	УГЛЫ ТРЕНИЯ	
	ДВИЖЕНИЯ, α_d	ПОКОЯ, α_{II}
ПЕСОК	$32,8^\circ \pm 5^\circ$	$36,2^\circ \pm 3^\circ$
НАСЛ	$30,8^\circ \pm 4,6^\circ$	$36,9^\circ \pm 2,7^\circ$
ПОРОШОК СТАЛИ	$31,5^\circ \pm 5,2^\circ$	$39,1^\circ \pm 2,6^\circ$
ЦЕМЕНТ	$16,5^\circ \pm 3,2^\circ$	$29,0^\circ \pm 2,8^\circ$



КОНЦЕНТРАЦИЯ КЛЮЧЕВОГО КОМПОНЕНТА

РИС. 7 ЗАВИСИМОСТЬ УГЛОВ ТРЕНИЯ СМЕСЕЙ ОТ СОДЕРЖАНИЯ КЛЮЧЕВОГО КОМПОНЕНТА

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ ОТ СОСТАВА СМЕСИ НА ПРИМЕРЕ УГЛОВ ТРЕНИЯ ПРЕДСТАВЛЕНО ГРАФИЧЕСКИ НА РИС. 7.

УЧИТЫВАЯ, ЧТО ВЕЛИЧИНА ПРОЯВЛЕНИЯ СВОЙСТВА СМЕСИ ЗАВИСИТ ОТ ОБЪЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ КОМПОНЕНТОВ, ТО ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ УГЛОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ СМЕСИ: ЦЕМЕНТ + ПОВАРЕННАЯ СОЛЬ (НАСЛ) (РИС. 7) СООТВЕТСТВЕННО ЛИНИИ 1 И 2. ТОЧКАМИ С ЗОНОЙ РАЗБРОСА ПРИВЕДЕНЫ ЗНАЧЕНИЯ УГЛОВ ДЛЯ СМЕСЕЙ 0,66 И 0,33 ПО КЛЮЧЕВОМУ КОМПОНЕНТУ (ЦЕМЕНТУ). ЛИНИЯ 3 СООТВЕТСТВУЕТ ИЗМЕНЕНИЮ УГЛА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ДЛЯ СМЕСИ УГОЛЬ + ПЕСОК (С СОДЕРЖАНИЕМ ПЕСКА КАК КЛЮЧЕВОГО КОМПОНЕНТА 0,23 И 0,45). МАКСИМАЛЬНОЕ РАЗЛИЧИЕ В ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ УГЛОВ ТРЕНИЯ НЕ ПРЕВЫСИЛО $\pm 12\%$. ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДТВЕРЖДАЮТ, ЧТО ЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ВАЖНОГО ПАРАМЕТРА СМЕСИ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ПО ЗНАЧЕНИЯМ ЭТОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЖДОГО КОМПОНЕНТА И ИХ ОБЪЕМНОГО СОДЕРЖАНИЯ В КОМПОЗИЦИИ. СЛЕДУЕТ ОТМЕТИТЬ, ЧТО ПОСТОЯНСТВО ЛЮБОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА СМЕСИ МОЖЕТ БЫТЬ ИСПОЛЬЗОВАНО ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА. ОДНАКО ПРОЩЕ И НАДЕЖНЕЕ ОЦЕНКА ПО СВОЙСТВУ, БОЛЕЕ ОТЛИЧНОМУ У ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ СМЕСИ КОМПОНЕНТОВ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СМЕСИ, В КОТОРОЙ ОБЪЕМ ЯЧЕЙКИ СООТВЕТСТВУЕТ МИНИМАЛЬНОМУ ОБЪЕМУ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ ПРОБЫ, ЗНАЧИТЕЛЬНО СНИЗИТ ЭНЕРГОЗАТРАТЫ, ТАК КАК СУММАРНЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ КОМПОНЕНТОВ СОКРАЩАЮТСЯ, А КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕБУЕМОЙ ОДНОРОДНОСТИ ЗНАЧИТЕЛЬНО НИЖЕ, ЧЕМ У ИДЕАЛЬНОЙ СМЕСИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МИКРООБЪЕМОВ ИЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ СМЕШИВАНИЯ СТАВИТ ЗАДАЧУ НАХОЖДЕНИЯ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЧАСТИЦ.

3.3 Экспериментальное определение сил сопротивления движению частиц в плотных слоях

Важным фактором оценки эффективности организации процесса смешивания является значение работы, необходимой для получения структуры смеси сыпучих материалов технологически необходимой однородности. Для этого необходимо знать минимальное значение работы потребной для формирования структуры смеси.

Смесь сыпучих материалов – равномерное распределение исходных компонентов по реакционному объему смесителей. Структуру готовой смеси можно представить как совокупность отдельных микрообъемов, в которых соблюдена пропорциональность состава. Минимальный микрообъем в пределе можно представить как коллектив частиц, содержащий одну частицу ключевого компонента (находящегося в смеси в меньшем количестве, по сравнению с остальными компонентами). Традиционные конструкции смесителей реализуют схему перераспределения компонентов от исходной загрузки до конечной структуры механическими перемещениями. Для определения энергозатрат на реализацию процесса

необходимо определить суммарное перемещение отдельных частиц компонентов, или их микрообъемов, до образования структуры смеси и силы сопротивления этим перемещениям. Для нахождения перемещения частиц воспользуемся схемой на (рис. 8)

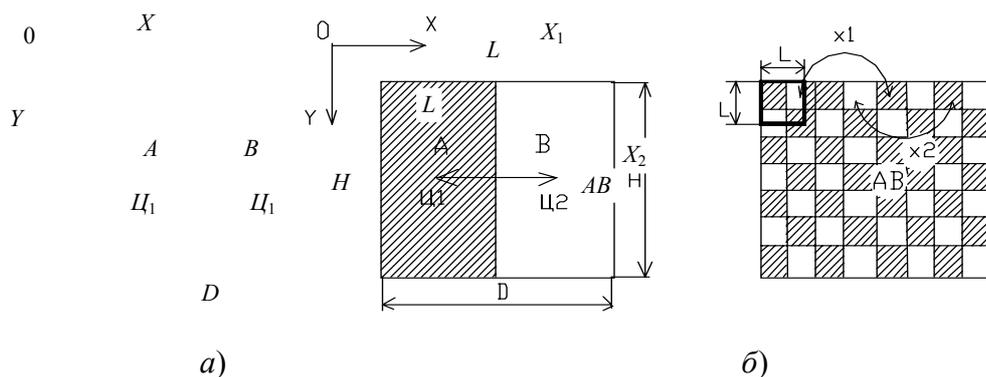


Рис. 8 Схема образования смеси:

a – исходное состояние двухкомпонентной смеси; *б* – состояние смеси после смешивания; $\text{Ц}_1, \text{Ц}_2$ – центры тяжести; X_1, X_2 – перемещение частиц;

$$L \text{ – линейный размер единичного микрообъема } L = \sqrt[3]{\frac{\pi d_k^3 k}{6C}};$$

D – диаметр (для цилиндрических емкостей); H – высота

Анализируя возможные перемещения частиц ключевого (*A*) и основного (*B*) компонентов, полагая что они осуществляется по кратчайшему пути, легко получаем, что среднее перемещение частиц исходных компонентов будет равно расстоянию между центрами тяжести загруженных компонентов (*AB*). Для образования смеси необходимо переместить некоторое количество частиц N , которое можно определить из числа микрообъемов смеси, организованное в объеме занимаемом ключевым компонентом. С этой целью используем понятие объема минимальной пробы V , который содержит в пределе одну частицу ключевого компонента и в зависимости от концентрации смеси C основной компонент. С учетом сказанного

$$V = \frac{1}{6} \pi d_k^3 \frac{k}{C}, \quad (51)$$

где k – коэффициент, зависящий от плотности укладки слоя.

Тогда число частиц ключевого компонента, участвующих в перемещениях

$$N = \frac{\varepsilon \frac{\pi D^2}{4} H}{\frac{1}{6} \pi d_k^3} (1 - C), \quad (52)$$

где ε – порозность укладки части ключевого компонента после загрузки в смеситель.

Логично, что такое же число частиц основного компонента должны осуществить встречное перемещение. Для нахождения минимальной энергии на смесеобразование необходимо найти силы сопротивления вышеописанному движению частиц.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТ НА ПРОЦЕСС СМЕШИВАНИЯ ТРЕБУЕТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАХОЖДЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СИЛЫ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЧАСТИЦЫ КОМПОНЕНТОВ В СМЕСИ. ДЛЯ ЭТОГО ИСПОЛЬЗОВАЛАСЬ УСТАНОВКА, СХЕМА КОТОРОЙ ПРЕДСТАВЛЕНА НА РИС. 9.

УСТАНОВКА ПРЕДСТАВЛЯЛА СОБОЙ КОРОбЧАТЫЙ ОБЪЕМ (РИС. 9, А) С РАЗМЕРАМИ, ИСКЛЮЧАЮЩИМИ ВЛИЯНИЕ ПРИСТЕННОГО ЭФФЕКТА, ЗАПОЛНЕННЫЙ ИССЛЕДУЕМОМ МАТЕРИАЛОМ. ОДНА ИЗ БОКОВЫХ ПЛОСКОСТЕЙ КАМЕРЫ ИМЕЛА РЕЗЬБОВЫЕ УЗЛЫ – В, ПОЗВОЛЯЮЩИЕ ЗАКРЕПИТЬ ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО (РИС. 9, Б).

ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ОПЫТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ЧАСТИЦ НА СМЕННЫЙ СТЕРЖЕНЬ 10 НАКЛЕИВАЛАСЬ ЧАСТИЦА ИССЛЕДУЕМОГО МАТЕРИАЛА И ПОМЕЩАЛАСЬ В ОДНУ ИЗ ТОЧЕК ОБЪЕМА (1...9). ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО С ПОМОЩЬЮ ВИНТА 11 СОЗДАВАЛО ДЕФОРМАЦИЮ ПРУЖИНЫ 12, ОБЛАДАЮЩЕЙ ЖЕСТКОСТЬЮ 66,7 Г/ММ, ПО ПОЛОЖЕНИЮ ФЛАЖКА 13 ФИКСИРОВАЛАСЬ ДЕФОРМАЦИЯ ПРУЖИНЫ В НАЧАЛЬНЫЙ МОМЕНТ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ КОМПОНЕНТА И В МОМЕНТ ПРЕКРАЩЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ. ПРОСТОЙ ПЕРЕСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ ДАЕТ ВОЗМОЖНОСТЬ НАХОЖДЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПЕРЕХОДАХ "ПОКОЙ – ДВИЖЕНИЕ" И "ДВИЖЕНИЕ – ПОКОЙ".

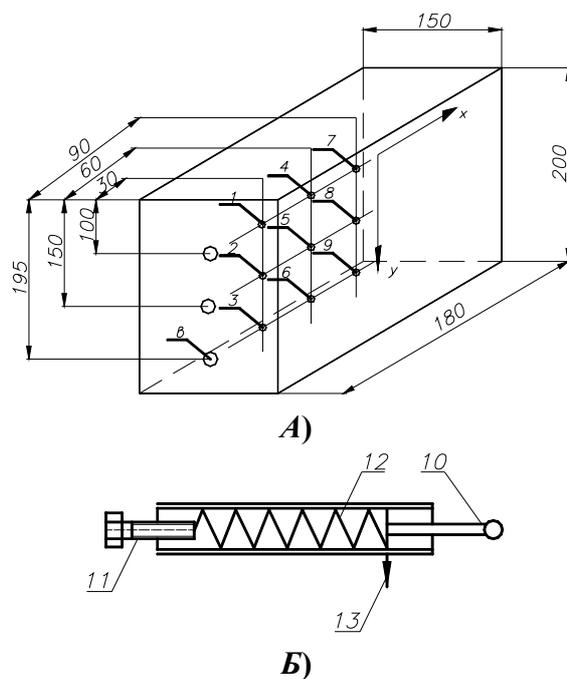


РИС. 9 СХЕМА УСТАНОВКИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЧАСТИЦ В ПЛОТНЫХ СЛОЯХ:

А – КАМЕРА С АНАЛИЗИРУЕМЫМ МАТЕРИАЛОМ; Б – ДИНАМОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО;

1...9 – ТОЧКИ НАЧАЛА ЭКСПЕРИМЕНТА

НАЗВАННЫЕ ВЕЛИЧИНЫ С УЧЕТОМ ГЛУБИНЫ РАССМАТРИВАЕМОГО СЛОЯ Y_1 И НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ АНАЛИЗИРУЕМОГО ПРОДУКТА ПОЗВОЛЯЮТ НАЙТИ ФУНКЦИОНАЛЬНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ЧАСТИЦУ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ Y , Т.Е. ПОЛУЧИТЬ $P_f = F(Y_1)$, НЕОБХОДИМУЮ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЭНЕРГИИ НА ПРОЦЕСС ПРИГОТОВЛЕНИЯ СМЕСИ. ПОМИМО ОПИСАННОГО НАЗНАЧЕНИЯ УСТАНОВКА (РИС. 9) ИСПОЛЬЗОВАЛАСЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРЕНИЯ ПОКОЯ И ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ, ПРОВОДЯ ОПЫТЫ, В КОТОРЫХ МОДЕЛИРОВАЛАСЬ СИЛА НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ.

Рассмотрим подробнее минимальные энергозатраты на перераспределение частиц характеризуют перемещения по кратчайшим траекториям. Сложность в количественном определении затрат связана с недостаточной изученностью вопроса взаимодействия частиц при движении в плотных слоях. Однако, в теоретическом плане при установленной функциональной связи этого взаимодействия частиц потребная энергия на процесс смешивания определима. Рассмотрим решение этой задачи в общем виде. Расчетная схема определения энергозатрат на приготовление смеси сыпучих материалов представлена на рис. 10.

Примем начальную и конечную координату перемещения частицы при изменении структуры $x_{н_i}$ и $x_{к_i}$; силу нормального давления на частицу, линейно зависящую от глубины нахождения частицы в слое

$$P_i = f(y_i), \quad (53)$$

где y_i – глубина нахождения частицы в слое.

Для простоты рассмотрения получаемых зависимостей частицы компонентов имеют одинаковые определяющие размеры ($d_k = d_0$). Образование структуры идеальной смеси будет закончено, когда часть частиц ключевого компонента, совершив определенные перемещения, создаст равномерное распределение компонента по реакционному объему смесителя. Учитывая, что конечные точки перемещения частиц ключевого компонента заняты частицами основного, то процесс смешивания будет закончен при выполнении обмена положениями частиц, т.е., продолжая мысль, частицы основного компонента, освобождая положение под частицы ключевого, совершат перемещения обратные. Возникает вопрос, какое количество частиц компонентов участвует в перемещениях? Вполне логично, если ключевой компонент занимает часть объема смесителя, определяемую концентрацией c , то для равномерного распределения частиц в незанятом компонентом объеме $(1 - c)$ частицам придется поменять первоначальное положение. Таким образом, из ранее определенного числа частиц ключевого компонента в объеме смесителя – $n_k = n_c c$, в перемещениях участвуют – $n_c c (1 - c)$. Перемещения частиц ключевого компонента требуют свободных мест в объеме, занятом основным компонентом, поэтому для получения структуры смеси помимо частиц ключевого компонента такое же количество частиц основного компонента примет участие в движении. Тогда общее число частиц компонентов, принимающих участие в перемещениях – $2n_c c (1 - c)$. Следующий фактор, определяющий энергозатраты на обмен частиц, – величины перемещения частиц.

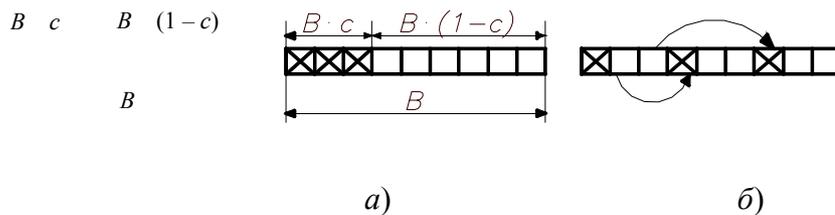


Рис. 10 Траектории движения частиц ключевого компонента одного горизонтального ряда при смешивании:

a – исходное положение частиц; *б* – положение частиц в структуре смеси

Обратимся к рис. 10, иллюстрирующему перемещения по кратчайшим путям частиц ключевого компонента при образовании структуры смеси.

Пусть по высоте реакционного объема смесителя в структуре смеси образуется k горизонтальных рядов и в каждом ряду находится n частиц ключевого компонента, тогда

$$n_c c = k n. \quad (54)$$

В структуре смеси частицы ключевого компонента ряда равноудалены друг от друга и расстояния между соседними, равны минимальному перемещению частицы

$$\Delta x_{\min} = \frac{B k}{n_c c}. \quad (55)$$

Тогда, зная, что в перемещениях участвуют $n_c c (1 - c)$ частиц, легко установить, что пройденный путь частицами ключевого компонента в ряду образует увеличивающийся арифметический ряд с разностью равной Δx_{\min} , и числом членов $\frac{n_c c (1 - c)}{k}$; последняя частица по схеме рис. 10 крайняя левая, участвующая в перемещениях

$\frac{n_c c (1 - c)}{k}$ совершает путь – Δx_{\min} ; предпоследняя: $\frac{n_c c (1 - c)}{k} - 1$ совершает путь

– $2\Delta x_{\min} \frac{n_c c(1-c)}{k} - i$ совершает путь – $i \Delta x_{\min}$; первая (крайняя правая) совершает путь $\frac{n_c c(1-c)}{k} \Delta x_{\min}$.

Подставив в выражение пути для первой частицы $\Delta x_{\min} = \frac{Bk}{n_c c}$, получим $\Delta x_{\max} = B(1-c)$.

Суммарное перемещение частиц ключевого компонента ряда

$$\sum_{i=1}^{i=\frac{n_c c(1-c)}{k}} \Delta x_i = \left[\Delta x_1 + \Delta x_{\frac{n_c c(1-c)}{k}} \right] \frac{n_c c(1-c)}{2k}, \quad (56)$$

подставляя в (56) значения Δx_1 и $\Delta x_{\frac{n_c c(1-c)}{k}}$

$$\sum_{i=1}^{i=\frac{n_c c(1-c)}{k}} \Delta x_i = \left[\frac{Bk}{n_c c} + \frac{Bk}{n_c c} \frac{n_c c(1-c)}{k} \right] \frac{n_c c(1-c)}{2k}, \quad (57)$$

ПРЕОБРАЗУЯ, ПОЛУЧИМ

$$\sum_{i=1}^{i=\frac{n_c c(1-c)}{k}} \Delta x_i = \frac{B(1-c)}{2} \left[1 + \frac{n_c c(1-c)}{k} \right]. \quad (58)$$

Для определения силового воздействия для перемещения частиц в слое рассмотрим состояние сил, действующих на частицу в момент начала движений ее в j горизонтальном ряду: $P_j (f_{\text{н}} - f_{\text{д}}) = m \ddot{x}$, где P_j – сила нормального давления на j – горизонтальном уровне; $f_{\text{н}}$ – коэффициент трения покоя частиц материала о нижележащий слой частиц; \ddot{x} – ускорение движения частицы; $f_{\text{д}}$ – коэффициент трения движения частиц.

Началом процесса смешивания (перемещение частиц) на j горизонтальном ряду является приложение к каждой частице силы, равной $P_j f_{\text{н}}$, тогда работа по перемещению частиц j – ряда для образования распределения частиц компонентов, соответствующего структуре смеси

$$A_j = p_j f_{\text{н}} 2 \sum_{i=1}^{i=\frac{n_c c(1-c)}{k}} \Delta x_i. \quad (59)$$

Удвоение суммарного перемещения частиц ключевого компонента по оси x вызвано необходимостью освобождения мест в структуре смеси частицами основного компонента. В процессе смешивания реализуется обмен в позициях некоторых частиц ключевого и основного компонентов, а именно – $\frac{2n_c c(1-c)}{k}$, учитывая, что перемещения частиц основного компонента – обратные, то суммарные перемещения частиц разных компонентов – одинаковы.

Для нахождения работы по формированию структуры смеси в объеме смесителя следует провести определение затрат на каждом уровне $j = 1, \dots, k$ и найти сумму

$$A = \sum_{j=1}^{j=k} A_j. \quad (60)$$

Зная, что перемещения частиц в каждом ряду дают постоянную сумму $-\sum \Delta x_i$ и частицы находятся в одинаковом силовом состоянии, то для нахождения работы на процесс смешивания следует найти среднее значение силы нормального давления P_m для всех горизонтальных рядов ячеек смесителя $P_m = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{k}$, зная функциональную зависимость $P_j = F(y)$ и то, что высота реакционного объема смесителя много больше размера частиц компонентов, определяющих высоту Δy_j – горизонтальных рядов, запишем

$$P_m = \frac{\int_0^y F(y) dy}{y}. \quad (61)$$

Тогда

$$A = \frac{\int_0^y F(y) dy}{y} 2k \sum_{i=1}^k \Delta x_i \quad i = \frac{n_c c(1-c)}{k} \quad (62)$$

или

$$A = \frac{\int_0^y F(y) dy}{y} \left[B k (1-c) \left(1 + \frac{n_c c(1-c)}{k} \right) \right]. \quad (63)$$

В случае, если законы изменения сил нормального давления различны, то при нахождении работы на реализацию процесса смешивания, следует ввести деление пройденных перемещений $\sum \Delta x_0$ и $\sum \Delta x_k$ соответственно частиц основного и ключевого компонентов в зонах действия различных нормальных сил. Эти уточнения не меняют сути методики, но несколько загромождают приведенные формулы. Аналогичные замечания следует отнести и к смесям с различными эквивалентными диаметрами частиц компонентов. Этот случай удобнее описать, выделив работы на перемещения частиц каждого компонента отдельно. При переходе от образования смеси в плоскости к реальной конструкции смесителя предложенная методика определения энергозатрат на процесс учтет перемещения компонентов в реакционном объеме аппарата.

Перемещения компонентов смеси в объеме смесителя. В основе предлагаемой последовательности расчета перемещений использованы структуры готовой смеси и первоначального раздельного положения смешиваемых объемов исходных компонентов [62]. Для простоты решения задачи принято, что диаметры частиц основного d_0 и ключевого d_k компонентов равны и в реализации процесса смешивания участвуют одинаковые числа частиц основного и ключевого материалов, помимо сказанного, при решении используем значение объемной концентрации ключевого компонента в составе смеси – c . Произведенные перемещения частиц проиллюстрируем на схемах рис. 11.

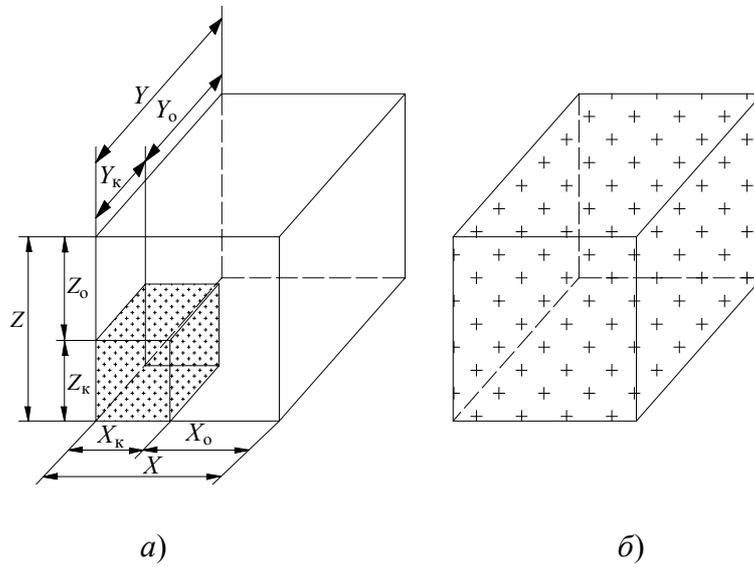


Рис. 11 Схема положения частиц компонентов смеси:
a – исходная загрузка, *б* – готовая смесь

Объем емкости смесителя

$$XYZ = V. \quad (64)$$

Объем ключевого компонента

$$X_k Y_k Z_k = V_k. \quad (65)$$

Объем основного компонента

$$X_o Y_o Z_o = V_o. \quad (66)$$

Тогда, имеем

$$X = X_k + X_o, \quad (67)$$

$$Y = Y_k + Y_o, \quad (68)$$

$$Z = Z_k + Z_o, \quad (69)$$

$$V = V_k + V_o, \quad (70)$$

$$c = \frac{V_k}{V_k + V_o}. \quad (71)$$

Учитывая, что занимаемые объемы – кубы, то линейные концентрации по координатным осям

$$\sqrt[3]{c} = \sqrt[3]{\frac{V_k}{V_k + V_o}} = c_x = c_y = c_z, \quad (72)$$

$$c_x = \frac{X_k}{X_k + X_o}, \quad (73)$$

$$c_y = \frac{Y_k}{Y_k + Y_0}, \quad (74)$$

$$c_z = \frac{Z_k}{Z_k + Z_0}. \quad (75)$$

Тогда количество частиц ключевого компонента по осям в рассматриваемом объеме

$$\frac{X_k}{d_k} = n_{kx}, \quad (76)$$

$$\frac{Y_k}{d_k} = n_{ky}, \quad (77)$$

$$\frac{Z_k}{d_k} = n_{kz}, \quad (78)$$

$$n_k = n_{kx} n_{ky} n_{kz}. \quad (79)$$

Число частиц ключевого компонента, подлежащее перемещениям

$$n_k (1 - c). \quad (80)$$

Рассмотрим перемещение частиц ключевого компонента по координатным осям. Первоначально частицы составляют ряд с длиной – X_k

$$X_k = X c_x. \quad (81)$$

Расстояние между частицами этого компонента в готовой смеси – X_{\min}

$$X_{\min} = \frac{X}{n_{kx}}. \quad (82)$$

Учитывая, что при смесеобразовании в движении участвует лишь часть частиц ключевого компонента

$$n_{kxg} = n_{kx} (1 - c_x), \quad (83)$$

определяем перемещения каждой из названных частиц, при этом получаем ряд значений, соответствующих арифметической прогрессии

$$\left. \begin{aligned}
 & n_{\text{кxг}} - \text{я} - \text{переместится на } -X(1-c_x) \\
 & (n_{\text{кxг}} - 1) - \text{я} - // - // - // - // - // - (X(1-c_x) - X_{\min}) \\
 & \dots \\
 & (n_{\text{кxг}} - i) - \text{я} - // - // - // - // - // - (X(1-c_x) - X_{\min} i) \\
 & \dots \\
 & 1 - \text{я} - // - // - // - // - // - X_{\min} \\
 & X_{\min} = \frac{X}{n_{\text{кx}}}
 \end{aligned} \right\} . \quad (84)$$

Аналогичные результаты получаем при определении перемещений частиц ключевого компонента по осям Y и Z

$$\text{по } Y \left. \begin{aligned}
 & n_{\text{кyг}} - \text{я} - \text{переместился на } -Y(1-c_y) \\
 & (n_{\text{кyг}} - 1) - \text{ш} - // - // - // - // - // - (Y(1-c_y) - Y_{\min}) \\
 & \dots \\
 & (n_{\text{кyг}} - i) - \text{ш} - // - // - // - // - // - (Y(1-c_y) - Y_{\min} i) \\
 & \dots \\
 & 1 - \text{ш} - // - // - // - // - // - Y_{\min} \\
 & Y_{\min} = \frac{Y}{n_{\text{кy}}}
 \end{aligned} \right\} , \quad (85)$$

$$\text{по } Z \left. \begin{aligned}
 & n_{\text{кzг}} - \text{я} - \text{переместился на } -Z(1-c_z) \\
 & (n_{\text{кzг}} - 1) - \text{ш} - // - // - // - // - // - (Z(1-c_z) - Z_{\min}) \\
 & \dots \\
 & (n_{\text{кzг}} - i) - \text{ш} - // - // - // - // - // - (Z(1-c_z) - Z_{\min} i) \\
 & \dots \\
 & 1 - \text{ш} - // - // - // - // - // - Z_{\min} \\
 & Z_{\min} = \frac{Z}{n_{\text{кz}}}
 \end{aligned} \right\} . \quad (86)$$

Тогда суммарные перемещения частиц ключевого компонента по координатным осям

$$\left. \begin{aligned} \sum X_k &= \frac{X(1-c_x) + X_{\min}}{2} n_{kx} (1-c_x) \\ \sum Y_k &= \frac{Y(1-c_y) + Y_{\min}}{2} n_{ky} (1-c_y) \\ \sum Z_k &= \frac{Z(1-c_z) + Z_{\min}}{2} n_{kz} (1-c_z) \end{aligned} \right\} \quad (87)$$

Эффективность процесса смешивания наивысшая при перемещении частиц по кратчайшим путям от положений при загрузке смесителя до мест, занимаемых ими в готовой смеси, тогда, соблюдая нумерацию частиц,

$$\left. \begin{aligned} n_g - \text{я} - \text{пройдет путь:} \\ S_{\max} &= \sqrt{[X(1-c_x)]^2 + [Y(1-c_y)]^2 + [Z(1-c_z)]^2} \\ \dots\dots\dots \\ n_{g-i} - \text{я} - // - // - // - // - //: \\ S_{n_{g-i}} &= \sqrt{[X(1-c_x) - X_{\min} i]^2 + [Y(1-c_y) - Y_{\min} i]^2 + [Z(1-c_z) - Z_{\min} i]^2} \\ \dots\dots\dots \\ 1 - \text{я} - // - // - // - // - // - //: \\ S_{\min} &= \sqrt{X_{\min}^2 + Y_{\min}^2 + Z_{\min}^2} \end{aligned} \right\} \quad (88)$$

Суммарные перемещения частиц ключевого компонента с учетом образовавшегося ряда (88)

$$\sum S = \frac{S_{\max} + S_{\min}}{2} \cdot \frac{n_k(1-c)}{2} \quad (89)$$

Реализация рассмотренных перемещений частиц компонентов смеси требует обменов в положениях, поэтому число частиц (ключевого и основного компонентов), участвующих в движении, при равенстве средних диаметров частиц $n_k(1-c)$, тогда суммарные перемещения частиц в процессе смесеприготовления

$$\begin{aligned} \sum S &= n_k(1-c) \frac{\sqrt{[X(1-c_x)]^2 + [Y(1-c_y)]^2 + [Z(1-c_z)]^2}}{2} + \\ &+ \frac{\sqrt{X_{\min}^2 + Y_{\min}^2 + Z_{\min}^2}}{2} \end{aligned} \quad (90)$$

Приведенная последовательность определения перемещений частиц при смесеприготовлении применима для любых первоначальных схем загрузки компонентов и форм объемов компонентов и смесителя. Следует отметить, что конкретизация названных условий и различие в средних размерах частиц компонентов усложнит вышеприведенные формулы, но не исключит применимость предлагаемой в настоящей работе методики. Для получения величины работы, необходимой для приготовления смеси,

следует определить силы сопротивления перемещения частиц компонентов по методике, изложенной в работе [22].

4 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Ранее отмечено влияние свойств исходных свойств компонентов на качество смеси сыпучих материалов и выбор конкретного метода оценки. Немаловажным фактором достоверности операции контроля готовой смеси является надежность в определении количественных проявлений свойств отдельных компонентов. Они составляют основу формирования свойств готового продукта. Сравнивая достоверности методов и методик определения свойств отдельных сыпучих материалов и готовой композиции, заметим, что первая группа должна обладать большей надежностью. Достичь надежных результатов при определении свойств позволит практический навык исследователей в проведении экспериментов, хорошем знании используемого лабораторного оборудования и измерительной техники. Формированию правильного общения со специфичными по проявлению свойств сыпучими материалами способствует предлагаемый к выполнению лабораторный практикум. Следует отметить, что значительная часть представленных методов определения свойств сыпучих материалов и смесей, лабораторная база являются результатом научной деятельности авторов настоящего пособия.

Лабораторная работа № 1

4.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВЫЯВЛЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕГО ФАКТОРА

Цель работы: ознакомление с методами анализа качества смеси сыпучих материалов и приобретение практических навыков в проведении исследований.

Оборудование: устройство для определения насыпной плотности, весы, набор сит, сушильная печь.

Порядок выполнения работы

- 1 Получить у преподавателя пробы исходных компонентов и смеси для анализа.
- 2 На основании анализа исходных компонентов выбрать разрешающий фактор, число и размер проб.
- 3 Определить значения разрешающего фактора X_1 и X_2 для полученных компонентов и $X_{см}$ для смеси в каждой пробе. Рассчитать значения \bar{X}_1 и \bar{X}_2 .
- 4 Рассчитать значения концентраций компонентов в смеси для каждой пробы, а также значения \bar{C}_1 и \bar{C}_2 .
- 5 Все полученные данные занести в табл. 2.
- 6 Рассчитать значение коэффициента неоднородности смеси.
- 7 Сделать вывод о качестве смеси.
- 8 Оформить отчет.

Таблица 2

N	X_{1i}	X_{2i}	$X_{см}$	$C_{1i}, \%$	$C_{2i}, \%$
1					
2					
3					

...					
<i>n</i>					

Содержание отчета

- 1 Краткое описание компонентов.
- 2 Обоснование выбранного разрешающего фактора.
- 3 Таблица экспериментальных данных.
- 4 Расчет значений показателей качества смеси.
- 5 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение смеси сыпучих материалов.
- 2 Показатели качества смеси сыпучих материалов.
- 3 Основные методы определения качества смеси.
- 4 Проба смеси, методы отбора проб.
- 5 Что такое разрешающий фактор?
- 6 Почему качество смешения оценивается параметрами распределения случайных величин? Назовите эти величины.

Лабораторная работа № 2

4.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ СИТОВОГО АНАЛИЗА

Цель работы: методом ситового анализа определить гранулометрический состав сыпучего материала и рассчитать основные характеристики полученного распределения.

Оборудование: набор сит, устройство для отсева сыпучего материала, весы.

Порядок выполнения работы

- 1 Все сита осторожно с помощью щетки очистить от остатков сыпучего материала.
- 2 Каждое сито взвесить на весах – $G_{\text{сит } i}$
- 3 Составить последовательный набор сит в порядке возрастания диаметров отверстий от нижнего сита к верхнему.
- 4 Взвесить пробу сыпучего материала массой порядка 0,5 кг и высыпать ее на верхнее сито.
- 5 Набор сит установить в поддон, закрыть крышкой и закрепить на машине для отсева сыпучего материала.
- 6 Включить устройство для отсева и продолжать сев в течение 7 – 10 мин.
- 7 Выключить устройство для отсева и каждое сито с остатком материала взвесить – $G_{\Sigma i}$.
- 8 Аналогичную процедуру согласно пп. 1 – 7 повторить несколько раз с новыми навесками материала.
- 9 Полученные экспериментальные данные записать в табл. 3.

Обработка результатов

Используя полученные экспериментальные данные провести следующие расчеты:

- 1 Для каждого опыта найти массы остатков материала на ситах: $m_i = G_{\Sigma i} - G_{\text{сит } i}$.
- 2 Рассчитать среднее значение из трех опытов масс остатков материала на каждом сите

$$m_{\text{cp},i} = \sum_{j=1}^3 m_{ij} / 3. \quad (91)$$

- 3 Рассчитать и построить функцию распределения массы частиц по размерам $R(\delta)$.
- 4 Найти эмпирические константы δ_e и α в уравнении Розина-Раммлера-Беннета, для чего дважды логарифмируя уравнение, получим

$$\ln[\ln R(\delta)^{-1}] = \alpha (\ln \delta - \ln \delta_e). \quad (92)$$

Если за функцию в этом уравнении принять $\ln[\ln R(\delta)^{-1}]$, а за аргумент $\ln \delta$, то не трудно заметить, что это будет уравнение прямой линии с коэффициентами $\ln \delta_e$ и α . Для численного нахождения величин δ_e и α необходимо проделать следующие операции:

- рассчитать значения $Y_i = \ln[\ln R(\delta)^{-1}]$ и $X = \ln \delta_i$;
- нанести полученные точки на график в координатах $X = f(x)$;
- через нанесенные точки провести прямую;
- на краях полученной прямой выбрать две точки: A и B ;
- определить координаты этих точек: точка $A (y_a, x_a)$, точка $B (y_b, x_b)$;
- составить систему уравнений

$$\begin{cases} y_a = -\ln \delta_e + \alpha x_a; \\ y_b = -\ln \delta_e + \alpha x_b. \end{cases}$$

из которой найти значения δ_e и α .

5 По найденной аналитической зависимости рассчитать значения $R(\delta)_{\text{расч}}$ и полученные значения нанести на график с экспериментальной зависимостью.

6 На выданные преподавателем координатные сетки нанести экспериментально полученные точки и определить, какая зависимость наилучшим образом описывает полученное распределение частиц.

7 Рассчитать и построить функцию распределения массы частиц по размерам $D(\delta)$.

8 Построить график функции плотности распределения массы частиц по размерам $f(\delta)$ методом графического дифференцирования кривой $D(\delta)$ (рис. 12);

- выбрать полюс P по координате δ ;
- на кривой $D(\delta)$ наметить ряд точек и построить в этих точках касательные к кривой;
- провести из полюса P линии параллельные касательным до пересечения с осью координат $D(\delta)$;
- отрезки, отсекаемые линиями на оси $D(\delta)$, будут соответствовать значениям функции $f(\delta)$;
- масштаб оси $f(\delta)$: в 1 мм ординаты $f(\delta)$ будет содержаться $D(\delta)/(n A) 1/\text{м}$, где $D(\delta) = 1$; A – длина в мм соответствующая $D(\delta) = 1$; n – отрезок OP в масштабе оси абсцисс.

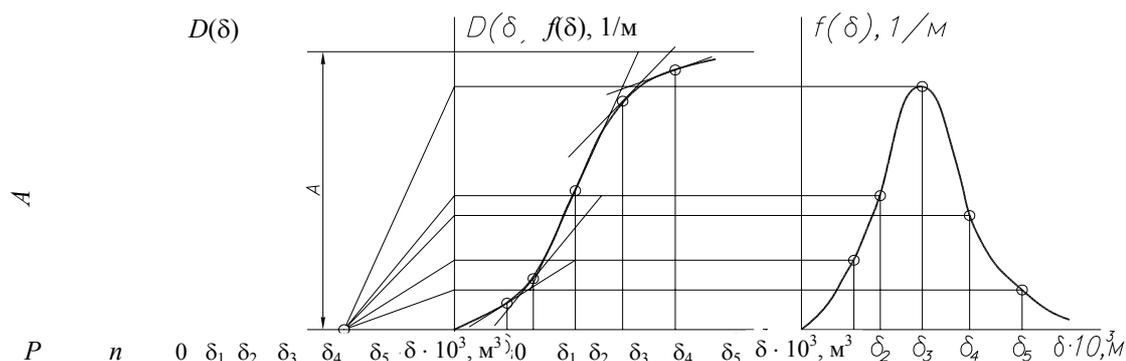


Рис. 12

Контрольные вопросы

- 1 В каких случаях применяют ситовой анализ состава сыпучего материала?
- 2 Какие параметры характеризуют гранулометрический состав материала?
- 3 Что такое проход материала сквозь сито?
- 4 Что такое остаток материала на сите?
- 5 Что такое функция распределения сыпучего материала.

- 6 Что такое функция плотности распределения массы?
- 7 Поясните сущность метода графического дифференцирования.
- 8 Какова необходимость проведения анализа состава сыпучего материала?
- 9 По каким параметрам сыпучего материала рассчитывают аппараты?

Лабораторная работа № 3

4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ФОТОИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: экспериментально определить гранулометрический состав порошкообразного материала на анализаторе механических примесей ФС-П2 и вычислить по полученным данным средний размер частиц.

Оборудование: анализатор механических примесей ФС-112, аналитические весы, мензурка.

Порядок выполнения работы

- 1 Изучить руководство по эксплуатации анализатора механических примесей ФС-112.
 - 2 Включить прибор ФС-112 согласно инструкции и оставить для прогрева в течение 20 минут.
 - 3 На аналитических весах взвесить 5 проб анализируемого порошкообразного материала по 10 мг каждая.
 - 4 После прогрева прибора произвести автоматическую подстройку чувствительности.
 - 5 Провести измерение фоновой концентрации частиц в разбавителе. Для этого на приборе установить минимальные уровни дискриминации согласно табл. 4 руководства по эксплуатации, во входящую воронку залить 50 мл разбавителя и провести измерения. Затем измерить уровень дискриминации, залить новую порцию разбавителя и опять провести измерения и т.д., аналогично для каждого диапазона размеров.
 - 6 Каждую навеску порошкообразного материала суспензировать в 50 мл разбавителя. По аналогии с п. 5 провести измерения концентрации частиц в суспензиях. Каждая проба материала используется для измерения концентрации частиц для какого-то одного диапазона размеров частиц.
- В случае анализа суспензий с быстро оседаемыми частицами рекомендуется в процессе измерения перемешивание пробы с помощью лопаточки (при перемешивании избегать резких ударов лопаточкой о стенки входной воронки).
- С целью повышения статистической достоверности измерения повторить несколько раз согласно пп. 5 и 6. Полученные данные занести в табл. 4.
- 7 Выключить прибор.

Обработка результатов

Используя полученные данные эксперимента, провести следующие расчеты:

- 1 Для каждого диапазона размеров частиц найти среднее значение из 3 опытов $n_{ср\ i}$ и $N_{ср\ i}$.
- 2 Рассчитать истинные значения количества частиц в анализируемых пробах сыпучего материала,

$$N_{ист\ i} = N_{ср\ i} - n_{ср\ i}.$$

- 3 Найти относительную концентрацию частиц

$$\bar{N}_i = N_{ист\ i} / \sum_{i=1}^5 N_{ист\ i}.$$

- 4 Построить гистограмму от δ .
- 5 Найти средний размер частиц сыпучего материала

$$\delta_{ср} = \sum_{i=1}^5 \delta_{ср\ i} \bar{N}_i.$$

Контрольные вопросы

- 1 В чем сущность фотоимпульсного метода измерения дисперсности сыпучего материала?
- 2 Область применения фотоимпульсного метода измерения.
- 3 Какие требования предъявляются к разбавителю?
- 4 Что такое уровень дискриминации?

- 5 Как подсчитывается количество частиц, соответствующее данному уровню дискриминации?
- 6 Как определить средний размер частиц?
- 7 В чем недостатки использования в расчетных теориях среднего размера частиц вместо кривой распределения частиц по размерам?
- 8 Что называется гистограммой и как ее построить?

Лабораторная работа № 4

4.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Цель работы: приобретение практических следований физико-механических свойств сыпучих материалов: определение углов естественного откоса и обрушения, насыпной плотности, а также обработка экспериментальных данных.

Оборудование: установка экспериментальная, весы ВЛК-500.

Описание и принцип работы экспериментальной установки

Экспериментальная установка для определения физико-механических характеристик сыпучих материалов (рис. 13) состоит из секторного короба 1, служащего для загрузки сыпучего материала, соединенного с приводом 2. Привод – ручной, работает при вращении ручки 3 и установлен на станине 4. На передней стенке секторного короба, на оси вращения установлена стрелка-указатель 5 наклона поверхности откоса сыпучего материала, а на периферии передней стенки установлена стрелка-указатель 6 поворота короба 1 [4].

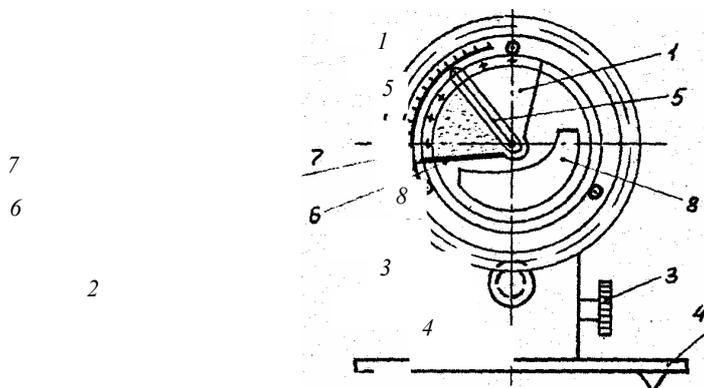


Рис. 13 Экспериментальная установка:

1 – короб секторный; 2 – привод; 3 – ручка привода; 4 – станина; 5 – стрелка-указатель наклона поверхности откоса сыпучего материала; 6 – стрелка-указатель поворота короба; 7 – угловая шкала; 8 – приемная емкость

Отсчет углов поворота короба 1 и наклона поверхности откоса сыпучего материала производится с помощью угловой шкалы 7. Для сбора сыпучего материала, ссыпающегося из секторного короба 1, имеется приемная емкость 8. Для измерения массы ссыпавшегося материала служат весы ВЛК-500.

Принцип работы данного прибора основан на периодическом обрушении слоя сыпучего материала при вращении секторного короба до угла поверхности откоса сыпучего материала, равного углу обрушения. Установка работает следующим образом. Секторный короб, загруженный сыпучим материалом, вращают против часовой стрелки до начала осыпания материала из короба в приемную емкость. В этот

момент вращения прекращается. Выжидают время пока материал осыпается в емкость и измеряют углы $\alpha_{д0}$ и α_0 (рис. 14, а).

Приемную емкость освобождают от ссыпавшегося сыпучего материала. После этого установка готова к измерению необходимых параметров материала. Продолжают вращение короба до очередного осыпания. В момент начала осыпания короб опять останавливают и по окончании осыпания измеряют угол естественного откоса $\alpha_{д1}$ и угол, отсчитанный по угловой шкале стрелкой – указателем поворота короба α_1 (рис. 14, б). Определяют массу материала M_1 , ссыпавшегося в приемную емкость.

Угол обрушения материала $\alpha_{п1}$ и насыпную плотность для данного измерения определяют по зависимостям

$$\alpha_{п1} = \alpha_{д1} + \Delta\alpha_1, \quad (93)$$

$$\rho_{п1} = \frac{360M_1}{\pi L R^2 (\alpha_{д0} + \Delta\alpha_1 - \alpha_{д1})}, \quad (94)$$

где $\Delta\alpha_1 = \alpha_1 - \alpha_0$; L – ширина секторного короба; R – радиус окружности сектора короба.

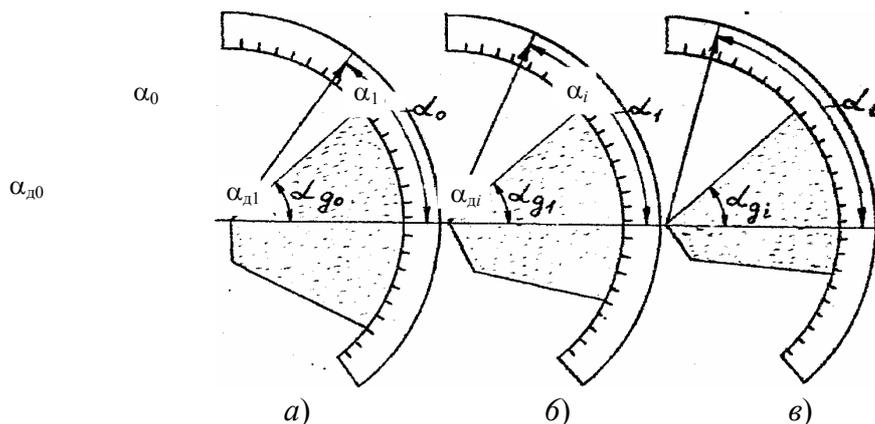


Рис. 14

В такой же последовательности проводятся последующие измерения до тех пор, пока не откроется место крепления дна короба. В общем виде расчетные зависимости для i -го измерения имеют вид (рис. 14, в)

$$\alpha_{пi} = \alpha_{ди} + \Delta\alpha_i, \quad (95)$$

$$\rho_{пi} = \frac{360M_i}{\pi L R^2 (\alpha_{ди-1} + \Delta\alpha_{i1} - \alpha_{ди})}, \quad (96)$$

где $\alpha_{ди}$ – угол естественного откоса материала в i -ом измерении; $\alpha_{пi}$ – угол обрушения материала в i -ом измерении; $\rho_{пi}$ – насыпная плотность материала в i -ом измерении; M_i – масса ссыпавшегося материала в i -ом измерении; $\alpha_{ди-1}$ – угол естественного откоса материал в предыдущей ($i - 1$)-ом измерении

$$\Delta\alpha_1 = \alpha_i - \alpha_{i-1}, \quad (97)$$

где α_i , α_{i-1} - угол, отсчитанный по угловой шкале стрелкой-указателем поворота короба в i -ом и $(i - 1)$ -ом измерении, соответственно.

Порядок выполнения работы

- 1 Установить прибор в исходное положение, засыпать сыпучий материал на лопасть наравне с лицевой стенкой. Лишний слой материала убрать линейкой без уплотнения материала.
- 2 Привести прибор в начальное положение, для чего плавно вращая сектор вокруг оси, добиться момента начала осыпания материала, после чего вращение прекратить.
- 3 Произвести измерения угла наклона образовавшейся поверхности сыпучего материала α_i и веса пустой приемной емкости M_0 , установить ее в месте осыпания материала.
- 4 Повторно вращая сектор, добиться момента начала ссыпания. Произвести измерения углового перемещения точки крепления лопасти, угла наклона вновь образовавшейся поверхности к горизонту и массы приемной емкости с материалом.
- 5 Повторить процедуру четыре несколько раз. Повтор прекращается, если образовавшаяся поверхность ссыпавшегося материала касается или располагается ниже точки крепления лопасти.
- 6 Повторять процедуру согласно пп. 1 – 5 с новой засыпкой материала, обеспечив не менее 25 – 30 значений величин α_d , $\Delta\alpha$, M .
- 7 Полученные экспериментальные данные записать в табл. 5.

Таблица 5

Засыпка № 1, $M_0 = \dots$, $\alpha_0 = \dots$

№ п/п	$\Delta\alpha$, град	α_d , град	$M = M -$ M_0 , кг	α_p , град	ρ_n , кг/м ³	Приме- чание
1	2	3	4	5	6	7
1						
1						
2						
3						
....						

Засыпка № ..., $M_0 = \dots$, $\alpha_0 = \dots$

1	2	3	4	5	6	7
....						
28						
29						
30						

Обработка результатов эксперимента

Используя полученные экспериментальные данные, произвести следующие расчеты:

1 Для каждого опыта массы ссыпавшегося материала:

а) для первого осыпания $M = M - M_0$;

б) для последующего ссыпания $M = M_i - M_{i-1}$.

2 РАССЧИТАТЬ ЗНАЧЕНИЯ НАСЫПНОЙ ПЛОТНОСТИ ДЛЯ КАЖДОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПО ФОРМУЛЕ (93).

3 Рассчитать значение угла обручения для каждого измерения.

4 Произвести статистическую обработку полученных систем числовых массивов характеристик сыпучего материала: α_d , α_n , ρ_n и определить их средние значения (математическое ожидание); среднее квадратическое отклонение S_x коэффициент вариации V_x по формулам

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{N}, \quad (98)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (x_i - \bar{x})^2}, \quad (99)$$

$$V_x = \frac{S_x}{\bar{x}}, \quad (100)$$

где x_i – значения величин α_{di} , α_{ni} , ρ_{ni} ; N – общее число замеров каждой из величин α_d , α_n , ρ_n .

Полученные данные занести в табл. 6 и произвести сопоставление угловых характеристик.

Таблица 6

Характеристики	Математическое ожидание, \bar{X}	Среднее квадратическое отклонение, S_x	Коэффициент вариации, V_x
α_d			
α_n			
ρ_n			

5 Определить значения коэффициента внутреннего трения φ и силы сцепления C по формулам

$$\varphi = \alpha_d - \arctg \left[\frac{2}{\sin 2(\alpha_n - \alpha_d)} - \frac{2\sqrt{3}}{\cos^2 \left(\frac{\alpha_n - \alpha_d}{2} \right) \sqrt{\frac{3}{4} \sin(\alpha_n - \alpha_d)}} \right], \quad (101)$$

$$C = \frac{g \rho_n R}{2} \left[1 - \sqrt{3} \operatorname{tg} \frac{(\alpha_n - \alpha_d)}{2} \right] \frac{\operatorname{tg}(\alpha_n - \alpha_d) \sin(\alpha_d - \varphi)}{2 \cos \varphi}. \quad (102)$$

6 Рассчитать значение комплексного показателя связности и определить класс сыпучего материала согласно [1].

Лабораторная работа № 5

4.5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА СМЕСИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: ознакомление с методами анализа качества смеси сыпучих материалов и приобретение практических навыков в проведении исследований.

Оборудование: устройство для определения насыпной плотности, весы, набор сит, сушильная печь.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо изучить содержание данных методических указаний и соответствующих разделов лекционного курса.

Порядок выполнения работы

1 Получить у преподавателя пробы исходных компонентов и смеси для анализа.

- 2 На основании анализа исходных компонентов выбирать разрешающий фактор, число и размер проб.
- 3 Определить значения разрешающего фактора X_1 и X_2 для полученных компонентов и $X_{см}$ для смеси в каждой пробе. Рассчитать значения X_1 и X_2 .
- 4 Рассчитать значения концентраций компонентов в смеси для каждой пробы по формулам (7) и (5), а также значения C_1 и C_2 .
- 5 Все полученные данные занести в табл. 7.
- 6 Рассчитать значение коэффициента неоднородности смеси.
- 7 Сделать вывод о качестве смеси.
- 8 Оформить отчет.

Таблица 7

N	X_{1i}	X_{2i}	$X_{см}$	$C_{1i}, \%$	$C_{2i}, \%$
1					
2					
3					
....					
n					

Содержание отчета

- 1 Краткое описание компонентов.
- 2 Обоснование выбранного разрешающего фактора.
- 3 Таблица экспериментальных данных.
- 4 Расчет значений показателей качества смеси.
- 5 Выводы по работе.

Контрольные вопросы

- 1 Дать определение смеси сыпучих материалов.
- 2 Показатели качества смеси сыпучих материалов.
- 3 Основные методы определения качества смеси.
- 4 Проба смеси, методы отбора проб.
- 5 Что такое разрешающий фактор?
- 6 Почему качество смешения оценивается параметрами распределения случайных величин? Назовите эти величины.

Лабораторная работа № 6

4.6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ НА СДВИГОВОМ ПРИБОРЕ

Цель работы: определение физико-механических характеристик сыпучих материалов: коэффициентов внутреннего трения и углов трения покоя и движения.

Оборудование и принадлежности: экспериментальная установка, исследуемые материалы.

Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 15) состоит из нижней неподвижной секции 3, подвижной секции 1, динамометрического измерительного устройства 4, резьбового нагрузочного винта 5 и прижимной плиты 2. Измерительное устройство 4 работает следующим образом: вращая нагрузочный винт 5, в измерительном устройстве 4 создаем сжатие пружины, которая одним концом соединена с винтом, а вторым упирается в стенку подвижной секции 1; при равновесии силы сжатия пружины и силы сопротивления

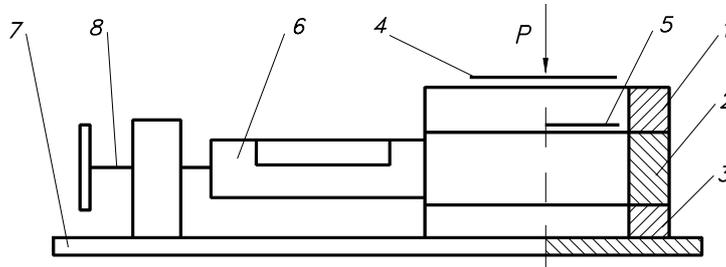


Рис. 15 Схема экспериментальной установки

движению секции 1, секция неподвижна относительно секции 3, увеличив силу сжатия пружины, заставим секцию 1 перемещаться относительно секции 3, зная жесткость пружины и ее деформацию, определяем силу сдвига [23].

Порядок проведения опытов

- 1 Установить верхнюю секцию в исходное положение (соответствует положению на рис. 9).
- 2 Провести нагружение секции 1 сдвигающей силой с помощью устройства 4. При этом зафиксировать силу начала движения секции и ее останова (повторить пункт 2 – 5 раз).
- 3 Произвести заполнение секций 1 и 3 в исходном положении исследуемым материалом 1.
- 4 Для материала 1 с помощью прижимной плиты 2 менять нормальную силу P (0, 5, 10 Н) по трем ступеням (повторить пункты 3 и 4 – 5 раз).
- 5 Полученные экспериментальные данные записать в табл. 1.
- 6 Для материала 2 аналогично повторить пункты 1 – 5.

Обработка результатов эксперимента

- 1 Заполнить табл. 1 экспериментальными данными.
- 2 Рассчитать средние значения коэффициентов $\tau_{\text{п}}$, $\tau_{\text{д}}$ по формуле $\tau_{\text{пр}} = f \sigma$.
- 3 Используя формулы ($f_{\text{д}} = \tau_{\text{пр д}} / \sigma_{\text{д}}$; $f_{\text{п}} = \tau_{\text{пр п}} / \sigma_{\text{п}}$), и средние значения экспериментальных данных определить коэффициенты трения движения $f_{\text{д}}$ и покоя $f_{\text{п}}$ для исследуемых материалов.
- 4 Для исследуемых дисперсных материалов 1 и 2, воспользовавшись выражением ($\alpha_i = \arctg f_{\text{тр}}$) рассчитать углы $\alpha_{\text{п}}$ и $\alpha_{\text{д}}$.
- 5 Построить график функций $\tau_{\text{пр}} = f(P)$.

Содержание отчета

- 1 Краткое описание и схема экспериментальной установки (рис. 15).
- 2 Таблица результатов экспериментальных измерений (табл. 8).
- 3 Расчет углов и коэффициентов внутреннего трения.
- 4 График функций.
- 5 Выводы по работе.

Экспериментальные данные

№ опыта	Незаполненная		Материал 1		Материал 2		Нагрузка $P, Н$
	τ_d	τ_n	τ_d	τ_n	τ_d	τ_n	
1							
5							
среднее							
1							
5							
среднее							
1							
5							
среднее							

Контрольные вопросы

- 1 Что такое сыпучий материал?
- 2 Назовите физико-механические характеристики сыпучего материала.
- 3 Объясните принцип работы экспериментальной установки.
- 4 В чем разница между коэффициентами трения покоя и движения?
- 5 Что такое насыпная плотность сыпучего материала?
- 6 В чем разница между углом естественного откоса и углом обрушения?
- 7 Различием каких исходных характеристик сыпучих материалов объясняется разница в углах и коэффициентах трения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александровский А.А. Исследование процесса смешения и разработка аппаратуры для приготовления композиций, содержащих твердую фазу: Дисс. ... док. техн. наук. – Казань, 1976.
2. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. – М.: Химия, 1982. – 256 с.
3. А.с. СССР № 1640616 МКИ 5G01 N19/02. Способ определения коэффициента внутреннего трения сыпучего материала / А.А. Букин, М.М. Свиридов. – 1991. – Бюл. – № 13.

4. А.с. СССР № 1083086 МКИ G01 B5/24 Устройство для определения углов естественного откоса и обрушения сыпучих материалов / М.П. Макевнин, В.Л. Негров, В.Ф. Першин, М.М. Свиридов. – 1984. – Бюл. – № 12.
5. Виденеев Ю.Д. Дозаторы непрерывного действия. – М.: Энергия, 1978. – 184 с.
6. Дженике Э.В. Складирование и выпуск сыпучих материалов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 184 с.
7. Кармаушенко Л.И. Взаимосвязь физико-механических свойств сыпучих материалов с подвижностью // Механика сыпучих материалов: Сб. тез. докл. 4 Всесоюзн. конф. – Одесса, 1980. – С. 41 – 42.
8. Каталымов А.В., Любартович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. – Л.: Химия, 1990. – 240 с.
9. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Арутюнов С.Ю. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов – М.: Наука, 1985. – 440 с.
10. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. М.: Химия, 1974. – 280 с.
11. Коптев А.А., Першин В.Ф., Свиридов М.М. и др. Особенности определения углов внутреннего трения сыпучих материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2001. – Т. 7, № 1. – С. 60 – 65.
12. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. Л.: Химия, 1983. – 143 с.
13. Макаров Ю.И. Основы расчета процессов смешения сыпучих материалов. Исследование и разработка смесительных аппаратов: Дисс. ... док. техн. наук. – М.: МИХМ, 1975.
14. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
15. Макаров Ю.И. Проблемы смешения сыпучих материалов // Журнал всесоюзного химического общества им. Д.И. Менделеева. – 1988. – Т. 33, № 4. – С. 384 – 389.
16. Модестов Б.С. Метод оптимального выбора дозирующего, смесительного и размольного оборудования для переработки сыпучего материалов химической промышленности с учетом их физико-механических свойств. Тез. 3 Всесоюзн. конф.: Механика сыпучих материалов. – Одесса, 1975.
17. Определение физико-механических характеристик сыпучего материала: Метод. указания / Сост.: В.П. Таров, В.Л. Негров – Тамбов: Тамб. ин-т хим. машиностроения, 1991. – 12 с.
18. Першин В.Ф., Свиридов М.М. Конструкции смесителей сыпучих материалов, обеспечивающие стабильный уровень качества смеси // Химическое и нефтехимическое машиностроение. – 1999. – № 8. – С. 13 – 15.
19. Стандарт АОИМ 105-58. Рекомендуемая практика в отношении вероятностного отбора проб материалов: Пер. с англ. – 1958. – С. 1030 – 1032.
20. Свиридов М.М., Таров В.П., Шубин И.Н. Текучесть сыпучего материала // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 1999. – Т. 5, № 4. – С. 55.
21. Свиридов М.М. Причины случайности структуры смеси сыпучих материалов / Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Моделирование САПР, АСНИ, ГАП". – Тамбов, 1989.
22. Свиридов М.М., Шубин И.Н. К вопросам определения работы на процесс смешивания сыпучих компонентов / Труды ТГТУ. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Вып. 8. – С. 77 – 81.
23. Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell. THE INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS EUROPEAN FEDERATION OF CHEMICAL ENGINEERING – Pub-

