

Автореф.

0-46

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ОСТАШЕВСКАЯ ЕЛЕНА ВАСИЛЬЕВНА

УДК 664:539.215.001.5

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СЫПУЧЕСТИ МАТЕРИАЛОВ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты пищевых  
производств

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесса - 1988

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им М.В.Ломоносова

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Карнаушенко Л.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор П.Н.Платонов  
кандидат технических наук,  
доцент Н.А.Недодаева

Ведущая организация НПО "Пищепромавтоматика" (г.Одесса).

Защита состоится "17 февраля" 1989 в 13<sup>00</sup> часов на заседании специализированного совета К 068.35.02 в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова по адресу: 270039, г.Одесса, ул.Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского технологического института пищевой промышленности им.М.В.Ломоносова

Автореферат разослан "28" декабря 1988 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета,  
п.т.н. профессор

*Л.И. Карнаушенко*  
Л.И. Карнаушенко

ОНАХТ 19.06.12  
Разработка методов о



v016449

Актуальность работы. В соответствии с решением июльского Пленума ЦК КПСС 1987г. была утверждена программа модернизации машиностроения во всех отраслях народного хозяйства, задача которой – создать мобильный научно-производственный потенциал, способный удовлетворить потребность народного хозяйства в самой современной технике.

До настоящего времени расчет и проектирование оборудования для переработки сыпучих материалов, используемых в пищевой промышленности и других отраслях Госагропрома СССР проводился на основе опытных данных, инженерной интуиции и общих положений в машиностроении, что не позволяет создать оборудование с высокими технико-экономическими показателями.

При переработке, хранении, транспортировании сыпучих материалов (СМ) необходимо располагать достоверными данными об основном объекте производства – сыпучем материале – его сыпучести, т.е. способности материала истекать из аппаратов, накопительных емкостей и т.д. Учет величин, определяющих сыпучесть материала в расчетной практике при создании аппаратов, оборудования по переработке СМ приводит к ритмичности этих процессов, бесперебойности работы аппаратов и оборудования, снижению энергоемкости. Отсутствие достаточно научно-обоснованных методов и устройств для определения сыпучести, теоретических разработок, а также истинных величин сыпучести с учетом влияния на них параметров СМ приводило к тому, что создаваемые аппараты и оборудование по их переработке не в полной мере отвечали требованиям промышленности.

Целью работы является разработка научно-обоснованных методов и устройств для определения параметров сыпучести материалов, определяющих процесс истечения, с теоретическим обоснованием, обеспечивающими оптимизацию технологических процессов, аппаратов и оборудования, используемых для их переработки и хранения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- получить аналитическую взаимосвязь скорости истечения, характеризующей сыпучесть материалов, с его основными физико-механическими свойствами;
- получить безразмерные параметры, определяющие подвижность материала;
- разработать методы и устройства для определения параметров сыпучести и деформативных характеристик сыпучих материалов;
- получить математические зависимости параметров сыпучести и деформативных характеристик сыпучих материалов и использовать полученные данные в расчетной практике при разработке аппаратов, технологических процессов и оборудования по их переработке и транспортированию.

Научная новизна работы состоит в разработке научно-обоснованных методов и устройств для определения сыпучести материалов, характеризующей процесс их истечения, с теоретическим обоснованием.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- аналитическая взаимосвязь скорости истечения, определяющей сыпучесть материала, с основными его физико-механическими свойствами;
- безразмерный параметр, оценивающий подвижность материала и его взаимосвязь с коэффициентами своодообразования и плотности укладки;
- методики и конструкции устройств для оценки сыпучести и компрессионных характеристик сыпучих материалов, выполненных на уровне изобретений.

Практическое значение и реализация работы

Результаты работы нашли практическое применение в промышленности и в научно-исследовательских организациях. Экспериментальные данные по деформативным характеристикам, параметрам оценивающим сыпучесть различных материалов, которые получены на разработанных устройствах, позволили оптимизировать технологические процессы, связанные с переработкой, транспортированием, накоплением сыпучих материалов.

Ряд методов и устройств для определения параметров сыпучих материалов защищены авторскими свидетельствами: а.с. №1330508, а.с. №1167476 и положительными решениями ВНИИПИЭ по заявке № 4297090/25-28 от 26.02.88г. и по заявке № 4184348/25-28 от 23.07.87г.

Результаты работы внедрены во ВНИИХСЗР, г.Москва с экономическим эффектом 151 тыс.рублей в год, ВНИИЭИ с ожидаемым экономическим эффектом 40 тыс.рублей.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Всесоюзных конференциях "Технология сыпучих материалов", г.Белгород, 1986г., "Теоретические и практические аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологических процессов пищевых производств", г.Москва, 1986г., "Механика сыпучих материалов", г.Одесса, 1980г., Республиканской научно-технической конференции "Совершенствование техники и технологии в пищевой промышленности и общественном питании", г.Кутаиси, 1988г., конференции молодых ученых и специалистов МГИП, г.Москва, 1981г., Всесоюзной научно-технической конференции "Применение аппаратов порошковой технологии и процессов термосинтеза в народном хозяйстве", г.Томск, 1987г., отраслевой научно-технической конференции "Пути дальнейшей интенсификации повышения эффективности производства калийных удобрений", г.Пермь, 1985г., семинаре "Интенсификация и автоматизация технологических процессов обработки пищевых продуктов", г.Москва, 1987г., отчетных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных

сотрудников ОТИП им.М.В.Ломоносова, г.Одесса, 1980-1988гг.

Публикация результатов. По материалам диссертационной работы опубликовано 17 научных статей, в том числе два авторских свидетельства и три положительных решения ВНИИПИЭ на выдачу авторских свидетельств

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов и рекомендаций, списка литературы и приложений. Работа изложена на 105 страницах машинописного текста и содержит 32 рисунка, 3 таблицы, 2 приложения. Список литературы включает 160 наименований, в том числе 20 иностранных.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе приведен анализ литературных источников по оценке сыпучести материалов.

Рассмотрены научные труды советских и зарубежных ученых:

Р.Л.Зенкова, Е.И.Шемякина, И.И.Лиштвана, П.Н.Платонова, А.Д.Зимона, Е.И.Андрианова, Л.И.Карнаушенко, С.А.Мачихина, Н.Б.Демкина, И.И.Берковича, Н.Г.Дубынина, Ю.А.Макарова, А.И.Зайцева, Н.В.Блиничева, Н.А.Недодаевой, Н.В.Науменко, Ю.А.Мачихина, Н.К.Залдастаншвили, И.И.Кандаурова, Л.В.Гячева, И.А.Цытовича, М. Аракава, К.Шиохара, Я.Новосада, Т.Танака и др.

Обзор литературных источников показывает, что хотя и существуют различные экспериментальные данные по исследованию сыпучести материалов, однако до настоящего времени не в полной мере раскрыт механизм сыпучести СМ, отсутствуют методы оценки сыпучести, а также приборы и устройства для их определения.

При исследовании процесса уплотнения и истечения не использовался комплексный подход к анализу факторов, влияющих на эти процессы. Не учет в существующих моделях в процессе истечения свойств СМ, таких как упругих, остаточных деформаций и сыпучести материала приводило к тому, что создаваемые автоматизированные системы управления технологическими процессами не в полной мере отвечали требованиям промышленности. В связи с этим, обоснована необходимость исследования свойств определяющих процесс истечения СМ, исследования деформативных характеристик и сыпучести материалов, определяющих процесс их истечения, с разработкой научно-обоснованных методов и устройств для их определения.

Во втором разделе выделены основные параметры, оценивающие процесс истечения: деформативные характеристики - коэффициенты пористости  $\varepsilon$ , плотности укладки  $K$  и характеристики сыпучести - скорость истечения  $U_0$ , коэффициент подвижности материала  $m$ .

Сыпучий материал представляет собой дискретную статистическую систему. Ввиду сложности процесса истечения СМ, который зависит как от конструктивных параметров аккумулирующих устройств, так и параметров

СМ, определяющих способность его к истечению, остановимся на последних. Для определения способности СМ к началу истечения важное значение приобретает соотношение между распределением вертикального  $\sigma'_i$  и горизонтального  $\sigma'_2$  напряжения в СМ, характеризующего подвижность материала  $m$ . Распределение напряжения в СМ в горизонтальном направлении зависит как от природы материала, определяемой величиной напряжения в своде  $\sigma_{on}$ , так и вертикального напряженного состояния материала  $\sigma'_i$ , плотности вещества  $\rho$ , насыпной плотности вещества  $\rho_n$ , гранулометрического состава  $d_i$ , влажности материала  $W$ . На распределение напряжения в СМ оказывают влияние внешние параметры: сроки хранения  $B$ , температура окружающей среды  $t$ , относительная влажность воздуха  $W_i$  и внешние воздействия: вибрация, удар и т.д.

При постоянной температуре окружающей среды  $t = const$ , сроках хранения материала  $B = const$ , относительной влажности воздуха  $W_i = const$  и без внешних воздействий на СМ передача давлений в горизонтальном направлении на боковые стенки сосуда может быть записана в виде:

$$\sigma'_2 = f(\sigma'_i, \rho, d_i, \rho_n, \sigma_{on}). \quad (I)$$

Предполагаем, что между переменными величинами существует определенная функциональная взаимосвязь в известном диапазоне, тогда уравнение (I) примет вид:

$$[\sigma'_2] = [\sigma'_i]^a [\rho]^b [d_i]^c [\sigma_{on}]^z [\rho_n]^c. \quad (2)$$

Подставив размерности соответствующих величин, получим уравнение размерностей:

$$\left[ \frac{H}{M^2} \right] = \left[ \frac{H}{M^2} \right]^a \left[ \frac{K_2}{M^3} \right]^b [M]^c \left[ \frac{H}{M^2} \right]^z \left[ \frac{K_2}{M^3} \right]^c. \quad (3)$$

Сопоставляя показатели степеней одноименных единиц измерений получим систему трех уравнений с пятью неизвестными. Приняв известными величинами  $z, c$ , выразим через них неизвестные  $a, b, q$ , и, подставив их в уравнение (2), получим:

$$[\sigma'_2] = [\sigma'_i]^{1-z} [\rho]^{-c} [d_i]^q [\sigma_{on}]^z [\rho_n]^c. \quad (4)$$

Группируя величины уравнения (4) с одноименными буквенными показателями и, сделав соответствующие преобразования, получим:

$$\left[ \frac{\sigma'_2}{\sigma'_i} \right] = \left[ \frac{\sigma_{on}}{\sigma'_i} \right]^z \left[ \frac{\rho_n}{\rho} \right]^c, \quad (5)$$

где:  $m = \sigma'_2 / \sigma'_i$  - коэффициент подвижности материала;

$\alpha = \sigma_{on} / \sigma'_i$  - коэффициент сводообразования;

$K = \rho_n / \rho$  - коэффициент плотности укладки СМ.

Подставив значения коэффициентов в уравнение (5), получим

обобщенную зависимость подвижности:

$$m = \alpha^z K^c. \quad (6)$$

По полученным коэффициентам, входящим в уравнение подвижности, можно оценить сыпучесть различных дисперсных материалов.

Сыпучесть дисперсных материалов определяется скоростью их истечения, последняя зависит как от природы материала, так и от внешних и внутренних параметров СМ.

Рассмотрим чем обуславливается скорость истечения из выпускных отверстий бункеров при условии, что внешние воздействия, конфигурация и размеры выпускного отверстия будут постоянными.

Согласно работ Р.Л.Зенкова скорость истечения  $V_0$  из выпускного отверстия определяется уравнением:

$$V_0 = \sqrt{2g \frac{\sigma_{ncp}}{\rho_n}}, \quad (7)$$

где:  $\sigma_{ncp}$  среднее давление над выпускным отверстием.

Давление СМ на площадь выпускного отверстия изменяется по его сечению. В центре столба истечения СМ (рис. I) наблюдается минимальное давление, численно равное напряжению в своде  $\sigma_{on}$ . Напряжение на боковой поверхности тела  $C-C$  определяется в точке  $C$  и это напряжение равно боковому давлению  $\sigma'_3$ . Максимальное вертикальное давление по периметру истечения определяется в точке  $B$  оно по величине больше чем  $\sigma_{on}$ . Среднее значение вертикального напряжения в центре выпускного отверстия определяется:

$$\sigma_{ncp} = \frac{\sigma_{on} + \sigma'_3}{2}. \quad (8)$$

Определим значение напряжения  $\sigma'_3$  равно:

$$\sigma'_3 = DM = 0.2 + 2.2 D_2. \quad (9)$$

Проведем через точку  $C$  касательную к линии предела текучести (ЛПТ) до пересечения ее с осью  $\tau_n$  получим точку  $E$  и отрезок  $OE$ , равный величине начального удельного сопротивления сдвигу  $\tau_{on}$ .

Из  $\triangle CEE$  находим значение  $CE$ , а из  $\triangle C D_2$  значение  $D_2$  и подставив в уравнение (9) получим:

$$\sigma'_3 = \sigma'_3 + 2(\sigma'_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_n + \tau_{on} \cdot \operatorname{tg} \varphi_n), \quad (10)$$

где:  $\varphi_n$  - угол внутреннего трения;

$\tau_{on}$  - начальное удельное сопротивление сдвигу.

Согласно работ Р.Л.Зенкова, известно, что  $\sigma'_3 = \sigma_{on} / m$ , тогда уравнение (9) примет вид:

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma_{on}}{m} (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \varphi_n) + 2 \tau_{on} \operatorname{tg} \varphi_n. \quad (11)$$

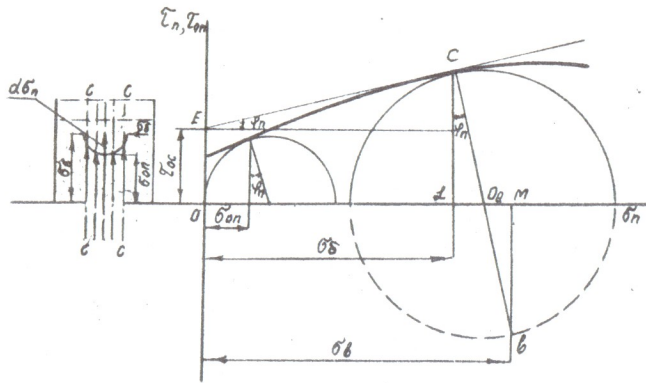


Рис.1. Распределение напряжений сыпучего материала в выпускном отверстии бункера с графической интерпретацией

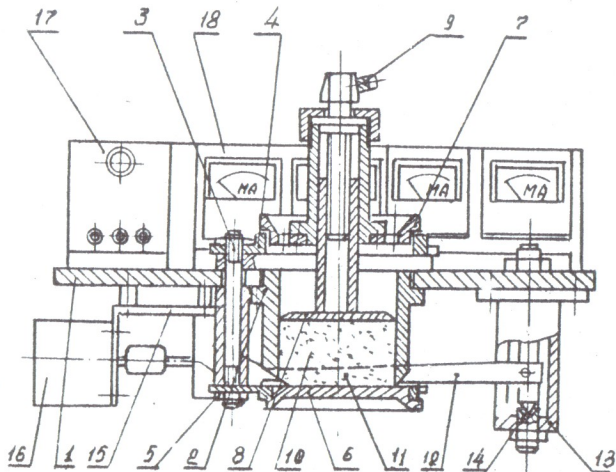


Рис.2. Принципиальная схема устройства для определения сыпучести материалов

Подставив значение  $\sigma_b$  в уравнение (8) получим:

$$\sigma_{ncp} = \frac{\sigma_{0n} \left(1 + \frac{1}{m} + \frac{2tg^2 \varphi_n}{m}\right) + 2C_{0n} tg \varphi_n}{2} \quad (12)$$

После подстановки значения (12) в (7), получим:

$$V_0 = \sqrt{\frac{g}{\rho_n} \left[ \sigma_{0n} \left(1 + \frac{1}{m} + \frac{2tg^2 \varphi_n}{m}\right) + 2C_{0n} tg \varphi_n \right]} \quad (13)$$

Таким образом, доказано, что  $V_0$  зависит от:  $\sigma_{0n}, C_{0n}, \varphi_n, f_n, m$ .

В работе также рассматривается взаимосвязь влияния входных и выходных параметров на скорость истечения, используется комплексный подход к анализу этого процесса.

В третьем разделе приведены описания методов и конструкций экспериментальных устройств для оценки параметров сыпучести СМ и деформативные характеристики.

В качестве объектов исследования были выбраны сыпучие материалы применяемые в пищевой, зерноперерабатывающей и других отраслях народного хозяйства, порошкообразные: мука первого сорта, крахмал, какао-порошок; мелкозернистые: манная крупа, макаронная мука высшего сорта; крупнозернистые: просо, пшеница, ячмень, металлические шарики с диаметром частиц 2мм.

Для определения компрессионных характеристик СМ использовался метод, основанный на одноосном сжатии. Разработанная установка позволяет достаточно точно исследовать деформативные характеристики СМ: коэффициент плотности укладки  $K$ , коэффициент пористости  $\epsilon$  в зависимости от их внутренних параметров, при постоянных внешних параметрах. Установка защищена положительным решением ВНИИГПЭ от 23.07.87 на выдачу авторского свидетельства по заявке № 4184348/25-28.

Разработанный метод и экспериментальная установка для определения скорости истечения СМ позволяет исследовать влияние внутренних и внешних параметров СМ на скорость истечения, характеризующей сыпучесть СМ. Установка состоит из цилиндра для испытываемого материала, в нижней части которого установлена подвижная конусная воронка со сменными рабочими деталями, и измерительного секундомера.

Для определения сыпучести материала разработан метод и экспериментальная установка, позволяющая определять основные коэффициенты СМ, характеризующие его сыпучесть: коэффициент подвижности материала  $m$  коэффициент способности СМ к сводообразованию  $\alpha$ , коэффициент плотности укладки  $K$ , а также величину напряжения в своде  $\sigma_{0n}$ . Порядок проведения эксперимента заключается в том, что в рабочий цилиндр 2 загружается определенная порция исследуемого материала 10. На цилиндр 2 с СМ (рис.2) устанавливается нагруженная система 7.

Вращением рукоятки 9 опускается поршень 8 вниз и сжимает исследуемый материал до заданной величины напряженного состояния  $\sigma_1$  в плоскости дна. После стабилизации процесса нагружения исследуемый материал выдерживается под нагрузкой определенное время. Затем поршень 8 поднимается вверх, нагрузка снимается и фиксируется величина остаточного напряжения  $\sigma_{0n}$  на дно цилиндра. Исследуемый материал снова нагружается до величины уплотнения в плоскости дна. При помощи электродвигателя 16 разгружается тензобалка, прижимающая вставку II к цилиндру, и фиксируется сила прижима боковой вставки к цилиндру, которая по величине равна силе распора CM в цилиндре  $\sigma_2$ .

Метод и конструкция устройства для определения сыпучести материала, оцениваемая величинами коэффициентов подвижности, коэффициентов самообразования CM защищены авторскими свидетельствами №1167476 и №1330508.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований влияния внутренних параметров на деформативные характеристики CM при нагрузке и разгрузке. В качестве исследуемых материалов были выбраны: мука первого сорта, макаронная мука высшего сорта, манная крупа, яблочный порошок, металлические шарики.

Из полученных экспериментальных данных видно, что коэффициенты пористости  $\epsilon$ , и плотности укладки  $K$ , для всех исследуемых материалов существенно зависят от природы сыпучего материала, влажности, напряженного состояния материала.

Экспериментальные данные обработаны на ЭМ и получены математические зависимости, которые приведены в диссертационной работе. Установлено, что с увеличением как влажности, так и напряженного состояния материала коэффициент пористости уменьшается, а коэффициент плотности укладки как величина обратная, соответственно увеличивается.

Аналитически полученная обобщенная зависимость (6) подтверждена экспериментально.

Степенные показатели  $\sigma$  и  $Z$  отражают взаимосвязь между  $m$ ,  $\sigma$ ,  $K$  и представлены в таблице. Численные значения показателей степеней обобщенного уравнения подвижности при неизменных внешних параметрах являются постоянными и зависят от природы материала.

Зависимости коэффициентов подвижности  $m$  от вертикального напряженного состояния для исследуемых материалов представлены на рис.3. Из приведенных данных видно, что с ростом напряженного состояния материала  $\sigma_1$  значения коэффициентов подвижности  $m$  уменьшается. Величина  $m$  зависит и от природы материала, его физико-механических свойств, и чем она выше, тем большей способностью к истечению обладает материал.

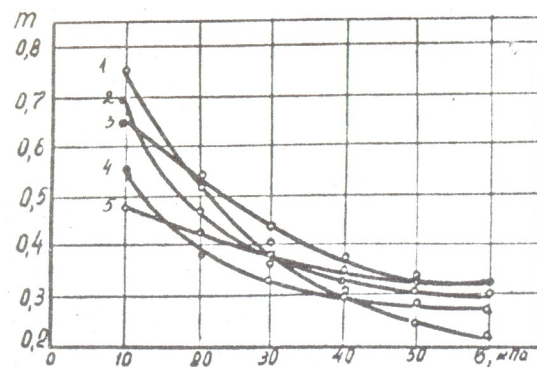


Рис. 3. Зависимость коэффициента подвижности  $m$  от напряженного состояния  $\sigma_1$  для: 1-муки первого сорта, 2-какао-порошка, 3-манной крупы, 4-яблочного порошка, 5-крахмала.

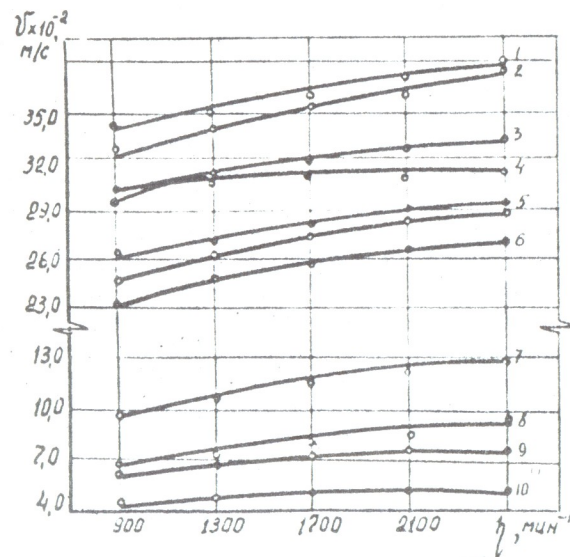


Рис. 4. Зависимость скорости истечения  $U$  от частоты колебания воронки  $f$  для: 1-металлических шариков, 2-макаронной муки, 3-пестицидов (0,6мм), 4-пшеницы, 5-пестицидов (0,21мм), 6-ячменя, 7-крахмала, 8-муки первого сорта, 9-муки высшего сорта, 10-пестицидов (0,075мм)

Таблица  
Значение коэффициентов уравнения 6

п/п	Исследуемый материал	Значения показателей степени	Значения показателей степени	
			C	Z
1.	Мука первого сорта	$W = 11,8\%$	0,224	0,12
2.	Манная крупа	$W = 12,8\%$	0,097	0,56
3.	Крахмал	$W = 7,1\%$	0,380	0,32
4.	Какао-порошок	$W = 4,2\%$	0,150	0,46

Значение коэффициента подвижности  $m$  зависит от напряжения и для исследуемых материалов описывается следующими математическими зависимостями:

$$\text{для муки первого сорта с } W = 11,8\% \\ m = 4,26 \cdot 10^{-4} \exp(1,216n - 0,056n^2), \quad (14)$$

$$\text{для манной крупы с } W = 12,8\% \\ m = 0,12 + 11,88/\tilde{\sigma}_n - 65,58/\tilde{\sigma}_n^2, \quad (15)$$

$$\text{для крахмала с } W = 7,1\% \\ m = 0,20 + 5,88/\tilde{\sigma}_n - 8,98/\tilde{\sigma}_n^2, \quad (16)$$

$$\text{для какао-порошка с } W = 4,2\% \\ m = 0,19 + 7,51/\tilde{\sigma}_n - 49,23/\tilde{\sigma}_n^2 \quad (17)$$

$$\text{для яблочного порошка с } W = 8,0\% \\ m = 0,25 + 2,69/\tilde{\sigma}_n + 3,39/\tilde{\sigma}_n^2. \quad (18)$$

Коэффициент подвижности определяется коэффициентом сводообразования  $\mathcal{E}$  и коэффициентом плотности укладки  $K$ . Согласно экспериментальных данных величина коэффициента сводообразования  $\mathcal{E}$  при упрочнении свода, т.е. при  $\tilde{\sigma} = 10 \text{ кПа}$ , стремится к постоянной величине. Максимальная величина коэффициента сводообразования  $\mathcal{E} \cdot \tilde{\sigma}_n / \tilde{\sigma}$  для исследуемых сыпучих материалов зависит от природы СМ, внутренних и внешних его параметров.

Коэффициент плотности укладки  $K$  исследуемых СМ с ростом напряженного состояния  $\tilde{\sigma}_n$  увеличивается. Экспериментальные данные по исследованию зависимостей  $\mathcal{E}$ ,  $K$  от  $\tilde{\sigma}_n$  обработаны на ЭВМ и получены математические модели, которые представлены в работе.

Скорость истечения материала, определяющая его сыпучесть, зависит как от внутренних параметров СМ: влажности  $W$ , гранулометрического состава  $d_i$ , напряженного состояния  $\tilde{\sigma}_n$ , насыпной плотности  $\rho_n$ , так и внешних: влажности окружающей среды  $W$ , времени хранения материала

$\beta$ , температуры окружающей среды  $t$ , амплитуды колебания выпускной воронки  $\alpha$  и частоты ее колебания  $\zeta$ .

На рис.4 представлены зависимости скорости истечения  $V_0$  от частоты колебания выпускной воронки  $\zeta$ , при постоянной амплитуде колебания  $\alpha$  для СМ, обладающих различной природой и разными физико-механическими свойствами.

Из полученных экспериментальных данных видно, что для всех исследуемых материалов с увеличением частоты колебания выпускной воронки  $\zeta$  от  $900 \text{ мин}^{-1}$  до  $2500 \text{ мин}^{-1}$ , при  $\alpha = \pm 17^\circ$  скорость истечения увеличивается. Следует отметить, что скорость истечения возрастает и при увеличении размера частиц материалов.

На скорость истечения СМ большое значение оказывает изменение их влажности  $W$ . Из результатов экспериментов, приведенных в работе видно, что с ростом влажности  $W$  скорость истечения  $V_0$  для всех исследуемых материалов уменьшается. Увеличение же амплитуды колебания выпускной воронки от  $\pm 4^\circ$  до  $\pm 17^\circ$  напротив, приводит к увеличению скорости истечения СМ.

Зависимости  $V = f(\alpha)$ ,  $V = f(\zeta)$ ,  $V = f(W)$  обработаны на ЭВМ, и получены соответствующие математические зависимости.

В работе приведены также зависимости скорости истечения СМ из емкостей от физико-механических свойств СМ: начального удельного сопротивления сдвигу  $\tau_{0n}$ , угла внутреннего трения  $\varphi_n$ , напряжения в своде  $\tilde{\sigma}_{0n}$ , коэффициента подвижности материала  $m$ , насыпной плотности  $\rho$ , а также от конфигурации и размера выпускного отверстия.

В пятом разделе приведены примеры практического применения результатов теоретических разработок, методик, устройств для определения параметров сыпучести, а также экспериментальных данных, которые внедрены во ВНИИХСЗР с реальным экономическим эффектом 151 тыс. рублей и ожидаемым экономическим эффектом 40 тыс. рублей во ВНИИЭИ.

#### ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

- На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы:
1. Предложено сыпучесть материалов, определяющую процесс их истечения, характеризовать деформативными характеристиками, скоростью истечения, коэффициентом подвижности.
  2. Получено обобщенное уравнение подвижности СМ, показывающее взаимосвязь коэффициента подвижности с коэффициентами сводообразования и плотности укладки, которое подтверждено экспериментально.
  3. Аналитически показана взаимосвязь скорости истечения сыпучих материалов с их физико-механическими свойствами и параметрами, подтвержденная

ценная экспериментально.

4. Разработан научно-обоснованный метод и экспериментальная установка по определению деформативных характеристик СМ, защищенные положительным решением о выдаче авторского свидетельства.
5. Разработан метод и экспериментальная установка по определению параметров, оценивающих сыпучесть СМ, конструкция которой защищена авторскими свидетельствами.
6. Экспериментально подтверждена взаимосвязь скорости истечения СМ с его внутренними и внешними параметрами с получением их математических моделей.
7. По экспериментальным данным получены математические модели деформативных характеристик для ряда СМ пищевой промышленности.
8. Теоретические, методические и экспериментальные данные, конструкции устройств для их определения внедрены в производство, при создании новых технологий по производству, а также при конструировании технологических аппаратов и оборудования для дозирования, аккумуляции и транспортирования СМ. Реальный экономический эффект от внедрения разработок составил 151 тыс.рублей в год, а ожидаемый 40 тыс.рублей в год.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Карнаушенко Л.И., Осташевская Е.В. Критериальное уравнение сыпучести порошковых материалов//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Применение аппаратов порошковой техн. и процессов термосинтеза в народном хозяйстве". - Томск. - 1987. - С.81.
2. Карнаушенко Л.И., Иоргачева Е.Г., Осташевская Е.В. Влияние внешних факторов на процесс сдвига сыпучих материалов//Хлебопекарная и кондитерская пром-ть, 1984. - №3. - С.27-29.
3. Иоргачева Е.Г., Осташевская Е.В., Лесовая С.В. Исследование влияния физико-механических свойств сыпучих материалов на их способность к сводообразованию//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Теоретич. и практич. аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологич. процессов пищ. производств". - 1986. - С.105.
4. Осташевская Е.В., Цыналевский В.Т. Влияние физико-механических свойств сыпучих материалов на механизм передачи давлений на боковые стенки сосудов//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Теоретич. и практич. аспекты применения методов инженерной физико-химической механики с целью совершенствования и интенсификации технологич. процессов пищ. производств". -М.- 1986. - С.161.

5. Прибор для определения сил адгезии мелкодисперсных сыпучих материалов/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. //Тезисы докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов". - Одесса. - 1980. - С.284.
6. Прибор для определения удельной силы разрыва мелкодисперсных сыпучих материалов/В.Т.Цыналевский, Л.И.Карнаушенко, Е.В.Осташевская и др.//Тезисы докл. IV Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов". - Одесса. - 1980. - С.285.
7. Осташевская Е.В., Карнаушенко Л.И., Корнев Н.К. Поверхностные свойства сыпучего материала на границе раздела с твердыми телами//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Механика сыпучих материалов". - Одесса. - 1980. - С.42.
8. Карнаушенко Л.И., Осташевская Е.В., Цыналевский В.Т. Физико-механические свойства шлама дистилляции содового производства//Химическая технология, 1986. - №1. - С.31-33.
9. Карнаушенко Л.И., Осташевская Е.В., Цыналевский В.Т. Математические модели основных физико-механических свойств некоторых сыпучих материалов химической промышленности//Деп. в ВНИИТИ №4, 1986, рег. № 43 УД-86 2.01.86.
10. Роль аутогезии в процессе классификации сыпучих материалов / Л.И.Карнаушенко, Е.Г.Иоргачева, Е.В.Осташевская и др.//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Технология сыпучих материалов". - Белгород. - 1986. - С.123.
11. Осташевская Е.В., Цыналевский В.Т., Житник А.И. Структурно-механические свойства порошковых материалов//Тезисы докл. Всесоюз. конф. "Применение аппаратов порошковой техн. и процессов термосинтеза в народном хозяйстве". - Томск. - 1987. - С.89.
12. Карнаушенко Л.И., Осташевская Е.В., Корнев Н.К. Влияние внутренних и внешних параметров сыпучих материалов пищевой промышленности на процесс истечения//Тезисы докл. Всесоюз. научно-техн. конф. "Совершенствование техники и технологии в пищевой промышленности и общественном питании". - Кутаиси. - 1988. - С.94.
13. А.с. №1167476 СССР МКИ G 01 N 3/04 Устройство для определения коэффициента бокового давления мелкодисперсных сыпучих материалов/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. (СССР) - №3703911/22-03; Заявл.23.02.84; Опубл.15.07.85. Бюл.№26.
14. А.с. №1330508 СССР МКИ G 01 N 3/26 Способ определения способности

сыпучих материалов к сводообразованию/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. (СССР) - №3915747/28-13; Заявл. 13.06.85; Опубл. 15.08.87. Бюл. №30.

15. Прибор для компрессионных испытаний сыпучих материалов/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. - Заявл. 10.II.86 №4184348/25-28, положительное решение ВНИИГПЭ о выдаче авторского свидетельства от 23.07.87.
16. Устройство для определения сопротивления сдвигу сыпучих материалов/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. - Заявл. 20.08.87 №4297090/25-28, положительное решение ВНИИГПЭ о выдаче авторского свидетельства от 26.02.88.
17. Устройство для определения способности порошков к истечению/Л.И.Карнаушенко, Н.К.Корнев, Е.В.Осташевская и др. - Заявл. 20.07.87. №4326387/31-25, положительное решение ВНИИГПЭ о выдаче авторского свидетельства от 14.II.88.

