

Автор ер.  
К 65

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

На правах рукописи

КОНШИН Виктор Николаевич

УДК.621.547.001.57

ВОСХОДЯЩЕЕ ТЕЧЕНИЕ АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
КАНАЛАХ / ПРИ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ /

Специальность 05.18.12 – процессы и аппараты пищевых  
производств

Переучет 1987

А в т о р е ф е р а т  
диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Одесс - 1983

СМ

Работа выполнена на кафедре механизации производственных процессов и автоматических линий Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В. Ломоносова.

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ: доктор технических наук  
профессор Ч.Н. ПЛАТОНОВ,  
кандидат технических наук  
доцент Ф.А. ФЁДОРОВ

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОПОНЕНТЫ: доктор технических наук  
профессор Ф.Г. ЗУЕВ,  
кандидат технических наук  
доцент Е.И. ВЕРЕМЕЕНКО

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Всесоюзный научно-исследовательский и экспериментально-конструкторский институт продовольственного машиностроения (г. Москва).

Защита состоится "4" июня 1983 г. в "13" часов на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при 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 "30" апреля 1983 г.

Ученый секретарь специализированного  
совета к.т.н., доцент

014335

*af*  
А.Ф. ЗАГИБАЛОВ

технологический

пищевой промышленности

Одесса

12

ОНАХТ

24.09.12

Восходящее течение а



v014335

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Одной из основных задач экономического и социального развития СССР на современном этапе является техническое перевооружение производства на основе использования достижений науки и техники, создание и внедрение нового высокоэкономичного оборудования и прогрессивной технологии.

Многие технологические процессы ряда отраслей промышленности, таких как пищевая, химическая, энергетическая и других, основаны на использовании дисперсных систем "газ-твердые частицы". К их числу относятся некоторые транспортные, тепло- и массообменные процессы, которые непосредственно связаны с явлениями, происходящими в этих дисперсных системах при их движении по трубам и каналам.

Одним из основных путей повышения эффективности процесса течения является увеличение концентрации твердых частиц в потоке.

Аэродисперсные потоки с высокой концентрацией обладают рядом существенных достоинств: относительно низкой удельной энергоемкостью; простотой разделения твердой и газовой фаз; возможностью движения с низкой скоростью и др. Но широкое промышленное использование потоков с высокой концентрацией твердых частиц ограничено тем, что в настоящее время практика не располагает научно-обоснованными и достаточно общими методами их расчета.

Цель работы. Целью настоящей работы является разработка метода расчета параметров вязкого восходящего течения аэродисперсных систем с высокой концентрацией твердого компонента. Этот метод должен обладать возможностью определения не только усредненных по объему потока параметров, но и их локальных значений в любой точке движущейся аэродисперсной системы.

Научная новизна. Разработан метод расчета, который позволяет определять как локальные, так и интегральные значения

параметров восходящего движения плотных аэродисперсных потоков в области вязкого течения.

Показана эффективность использования плотных аэродисперсных потоков с малой скоростью движения твердого компонента.

Практическое значение работы. Результаты исследования позволяют решать вопросы проектирования, надежности и эффективности работы устройств и аппаратов, в которых осуществляется вертикальное перемещение аэродисперсных систем с высокой концентрацией твердых частиц. Например: в пневмоподъемниках, в пневмогазовых сушилках, в химических реакторах и колонках с движущимся слоем твердого катализатора, в теплообменниках с твердым теплоносителем и др.

Производственная проверка разработанной методики расчета параметров аэродисперсного потока дала положительные результаты. Спроектирована и внедрена в промышленность транспортная установка, обеспечивающая надежное перемещение груза, минимальный расход энергии, малые скорости газовой среды и отсутствие потерь перемещаемого материала.

Автор защищает:

а) Научные положения:

Физической моделью двухкомпонентного потока, состоящего из газовой среды и твердых частиц, является движущаяся аэродисперсная система, у которой локальные значения параметров (давления, скорости движения, порозности и др.) изменяются по определенным закономерностям, как по радиусу, так и вдоль оси потока.

б) Наиболее существенные научные результаты, заключающиеся в следующем:

I. Составлено математическое описание процесса восходящего вязкого течения аэродисперсных систем с высокой концентрацией твердых частиц, основанное на формально-феноменологичес-

ком и структурном анализе.

2. Установлена функциональная связь локальных значений параметров аэродисперсного потока с его координатами.

3. Установлено, что для "псевдожидких" аэродисперсных систем, движущихся в режиме плотной фазы, величина коэффициента пристенного скольжения практически может считаться постоянной для каждой аэродисперсной системы и не зависящей от скорости течения и концентрации твердого компонента.

4. Показано, что величина коэффициента локальной "эффективной" вязкости аэродисперсной системы является функцией двух параметров: скорости фильтрации газовой среды и порозности системы. Между этими величинами установлена аналитическая зависимость.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", г. Одесса, 1971.

2. III Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", г. Одесса, 1975.

3. IV Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", г. Одесса, 1980.

4. Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников ОТИШ им. М.В. Ломоносова в 1972, 1976, 1978 гг.

Объем и структура диссертации. Основное содержание работы изложено на 169 листах. Работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы (98 названий), 29 рисунков, II таблиц.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В начале работы даны основные определения и термины. Под аэродисперсной системой понимаем гетерогенную систему, ограниченную стенками трубопровода и состоящую

из твердых частиц, относительно которых движется газовая среда.

В зависимости от внешних условий и скорости движения газовой среды относительно твердых частиц, аэродисперсная система находится в двух качественно различных состояниях. Первое состояние характеризуется наличием структурных связей между частицами твердого компонента, который образует некоторую пространственную структуру. Второе состояние имеет место в том случае, когда структурные связи между твердыми частицами отсутствуют, а сами частицы оказываются взвешенными в газовой среде. В первом случае аэродисперсную систему называем "структурированной", а во-втором - "псевдожидкой".

Аэродисперсную систему, находящуюся в состоянии направленного движения, называем аэродисперсным потоком.

В первой главе диссертации проведен обзор и анализ работ в области исследований вертикального восходящего движения аэродисперсных потоков вдоль цилиндрических поверхностей. Рассмотрены вопросы классификации, физического и математического моделирования, методов расчета основных параметров, устойчивости и энергоемкости процесса течения аэродисперсных потоков, а также сформулированы задачи исследования.

Изучению процесса движения аэродисперсных систем по трубопроводам уделяется значительное внимание отечественных и зарубежных ученых. В сферах научного исследования и промышленного применения аэродисперсных потоков достигнуты значительные результаты. Однако, несмотря на серьезные разработки в исследовании процессов, происходящих в аэродисперсных потоках, физическая суть этих процессов еще полностью не изучена. Это вызывает расхождение во взглядах на сущность явлений, возникающих при движении аэродисперсных систем.

В настоящее время, в области моделирования аэродисперсных по-

токов созданы, на основании формально-феноменологического и структурного подходов, физические модели: гомогенная и гетерогенная, которые с двух сторон отражают явления в этих потоках. Составлено математическое описание таких моделей дифференциальными уравнениями в частных производных. Однако, решение этих уравнений осуществляется путем введения ряда допущений, которые нельзя признать полностью адекватными реальным явлениям процесса движения аэродисперсных систем. В связи с этим, используемые в расчетной практике формулы имеют эмпирический характер, а входящие в них члены зависят, помимо прочих факторов, от координат аэродисперсного потока. Отсутствие в литературных источниках исчерпывающих сведений о внутренней структуре потока и закономерностях изменения локальных значений параметров течения вдоль его координатных осей ограничивает использование расчетных зависимостей область аэродисперсных потоков с низкой концентрацией твердого компонента ( $C_w < 0,2$ ). Для потоков с высокой концентрацией твердых частиц ( $C_w > 0,2$ ) современная практика не располагает обоснованными и достаточно общими методами расчета.

Относительно высокие технико-экономические показатели процесса течения аэродисперсных систем в режиме плотной фазы обуславливают необходимость первоочередного решения задач, связанных с возможностью их широкого практического использования.

На основании анализа современного состояния вопроса в области механики аэродисперсных потоков намечены задачи исследования:

1. Разработать математическую модель плотного аэродисперсного потока для случая вязкого течения по вертикальному цилиндрическому каналу с учетом феноменологических и структурных особенностей процесса.

2. Получить замкнутую систему уравнений динамики аэродисперсной системы.

3. Установить математическую связь между локальными значениями параметров течения и координатами аэродисперсного потока.

4. Произвести экспериментальную проверку разработанной методики расчета параметров аэродисперсного потока на лабораторной и промышленной установках.

Вторая глава посвящена расчетно-теоретическому анализу процесса восходящего движения аэродисперсной системы с высокой концентрацией твердых частиц по вертикальному трубопроводу.

Полагаем, что изменение локальных значений параметров вдоль координатных осей аэродисперсного тела подчинено определенным законам, функции их непрерывны и дифференцируемы, а размеры твердых частиц значительно меньше объема, занимаемого телом. На этом основании аэродисперсный поток представляем движущейся сплошной средой, реологические свойства которой характеризуем моделью вязко-пластичного тела.

Уравнение динамики такой среды в цилиндрической системе координат имеет вид

$$-\frac{\partial}{\partial r} (P_g + P_s) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial r} \right) = 0, \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} (P_g + P_s) + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \left( \mu_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial r} \right) -$$
$$-g[\varepsilon \rho_g + (1-\varepsilon)\rho_s] = (1-\varepsilon)\rho_s u \frac{\partial u}{\partial z} + \varepsilon \rho_g v \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) совместно с уравнениями неразрывности газового и твердого компонентов потока, уравнением движения газовой среды относительно твердых частиц и уравнением газового состояния Менделеева-Клапейрона составляют систему из шести уравнений, которые включают в себя восемь переменных величин:  $P_s$ ,

$P_g, \mu_\varepsilon, u, v, \omega, \rho_g, \varepsilon.$

Рассмотрим случай, когда движение аэродисперсного тела осу-

ществляется за счет энергии газовой среды. В этом случае наибольший практический интерес представляют аэродисперсные потоки, у которых структурные связи между твердыми частицами отсутствуют ( $P_s = 0$ ). В целях упрощения данной задачи полагаем, что величина давления газовой среды в поперечном сечении потока не изменяется, т.е.  $\frac{\partial P_g}{\partial r} = 0$ .

На основании анализа опубликованных работ в области исследования реологических свойств неподвижных аэродисперсных систем определена аналитическая связь коэффициента  $\mu_3$  с другими параметрами аэродисперсного тела:

$$\mu_3 = \frac{\beta}{E - E_{c.v}} \exp\left[-\frac{\gamma}{\omega_\phi}\right], \quad (3)$$

где опытные коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  зависят от свойств твердого и газового компонентов.

Используя условие, которое связывает скорости движения газовой среды и твердых частиц аэродисперсного потока:

$$v = u + \omega, \quad (4)$$

получаем замкнутую систему уравнений, описывающих процесс течения "псевдожидкого" аэродисперсного тела.

Уравнение движения газовой среды относительно твердых частиц в аэродисперсном потоке представляем формулой Козени-Кармана:

$$\frac{\partial P_g}{\partial z} = -k \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^2} \omega_\phi. \quad (5)$$

Устанавливаем функциональные зависимости локальных значений параметров аэродисперсного потока от его координат. Задаем аналитическое выражение функции скорости аэродисперсного потока вдоль его радиальной оси:

$$u_{(r,z)} = a_{(z)} (1 - br^{2m}). \quad (6)$$

Для определения коэффициентов формулы (6) введем понятие коэффициента пристенного скольжения

$$K_{sl} = \frac{u_{sl}}{R \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|_{r=R}}, \quad (7)$$

а также используем уравнение неразрывности твердой фазы потока.

$$a_{(x)} = \frac{1 - \bar{\epsilon}_0}{1 - \bar{\epsilon}_{(x)}} \frac{\bar{u}_0}{1 - \frac{1}{(2mK_{sl} + 1)(m+1)}}, \quad b = \frac{1}{(2mK_{sl} + 1)R^{2m}}.$$

Степень точности аппроксимации формулой (6) локальных значений скорости аэродисперсного потока в его поперечном сечении была оценена с помощью численного анализа. В основу расчета легло требование, чтобы зависимость (6) удовлетворяла совместному решению уравнений (1) и (2). При этом было сделано допущение о качественной независимости функции распределения скорости  $u$  в поперечном сечении потока от его высоты  $z$ . Расчет был проведен в следующем диапазоне варьирования входных параметров:

$$R \in [0,05 \dots 0,1] \text{ м}, M_s \in [1,4 \dots 20] \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \bar{u}_0 \in [0,5 \dots 2] \frac{\text{м}}{\text{с}}, \\ K_{sl} \in [0,1 \dots 0,4], \beta \in [40 \dots 20], \gamma \in [0,3 \dots 1] \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

В результате расчета установлено:

1. Относительная погрешность применения формулы (6) не превышает  $\pm 5\%$ . Причем, с увеличением порозности аэродисперсного потока величина погрешности уменьшается.

2. Величина показателя степени  $m$  в формуле (6) зависит от характера изменения текучих свойств аэродисперсного потока вдоль радиальной оси. В указанном диапазоне изменения коэффициентов  $\beta$  и  $\gamma$  показатель степени  $m$  принимает значения от 1,0 до 1,4.

3. С относительной погрешностью, не превышающей  $\pm 1,2\%$ , мож-

но считать, что между усредненными по сечению потока значениями градиента давления газовой среды, порозности потока и скорости фильтрации существует такая же функциональная связь, как и для локальных значений этих величин /см. формулу (5)/.

4. Увеличение скорости аэродисперсного потока  $\bar{u}$ , при постоянном расходе  $M_s$  твердого компонента, сопровождается снижением величины градиента давления газовой среды.

Результаты расчетного анализа позволили найти математическую связь величины давления  $P_g$  газовой среды и порозности  $\bar{\epsilon}$  аэродисперсного потока с его высотой  $z$  :

$$P_{g(z)} = \gamma \exp[-\alpha(z+l)^2], \quad (8)$$

$$\bar{\epsilon}_{(z)} = \frac{1}{1 + \frac{1-\bar{\epsilon}_0}{\bar{\epsilon}_0} \left[ \frac{P_{g(z)}}{P_{g_0}} \right]^q} \quad (9)$$

Коэффициенты формулы (8) определяем из условий на верхней /  $z=H$  ,  $P_{g(z)} = P_{gH}$  / и нижней /  $z=0$  ,  $P_{g(z)} = P_{g_0}$  / границах потока:

$$\gamma = P_{g_0} \exp(\alpha l) \quad \text{и} \quad \alpha = \ln \left[ \frac{P_{g(z)}}{P_{gH}} \right] / H(H+2l).$$

Таким образом, установлены аналитические связи локальных значений параметров аэродисперсного потока с его координатными осями. В системе уравнений, описывающих процесс течения "псевдожидких" аэродисперсных систем, неопределенной остается величина коэффициента пристенного скольжения  $K_{se}$ . Поэтому, для решения задачи движения аэродисперсной системы по вертикальному трубопроводу, необходимо задавать значения коэффициента  $K_{se}$ , полученные в результате предварительных экспериментальных исследований.

В диссертации рассмотрен случай движения "структурированного" аэродисперсного тела под действием внешних сил, приложен-

ных к основанию структуры твердого компонента. Характерной особенностью аэродисперсных систем, у которых частицы твердого компонента обладают структурными связями, является значительная величина "эффективной" вязкости, составляющая  $10^{15} \dots 10^{16}$  Па·с, которую практически можно считать бесконечно большой. Поэтому, процесс движения описываем уравнением динамики сплошных сред "в напряжениях", решение которого для случая стационарного движения сводится к определению условия начала "пластического" течения аэродисперсной системы вдоль отражающей поверхности, либо отдельных ее слоев друг относительно друга (см. рис. 1):

$$\frac{d\sigma_{sz}}{dz} - \frac{dP_g}{dz} - 2 \frac{\tau_r}{r} - g\rho_m = 0 \quad (10)$$

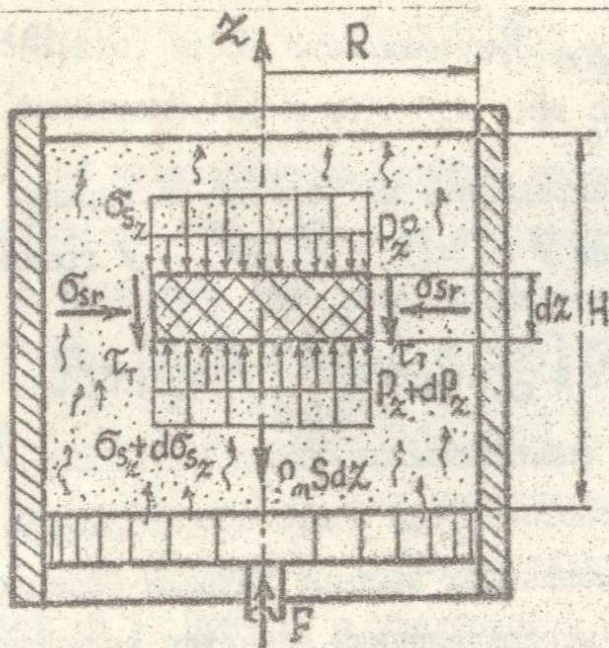


Рис. 1

Иллюстрация к задаче стационарного движения аэродисперсной системы под действием сил, приложенных к ее твердому компоненту.

Решение уравнения (10) при следующих допущениях:

- величина порозности аэродисперсного тела постоянна по его объему;
- между вертикальными и горизонтальными напряжениями в структуре твердого компонента существует пропорциональная зависимость:  $\sigma_{sr} = \psi \sigma_{sz}$  ;

- величина касательных напряжений, соответствующих пределу текучести, определяется зависимостью  $\tau_T = \sigma_{sz} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0$  :

имеет вид:

$$\sigma_{sz} = \frac{\rho_m R}{2\Lambda} \left\{ \exp\left[\frac{2}{R} \Lambda(H-z)\right] - 1 \right\} - k_f \omega_0 \sqrt{\frac{\pi R}{2\Lambda}} z_\infty \times \quad (II)$$

$$\times \exp\left[\frac{2}{R} \Lambda(z_\infty - z)\right] \left\{ \operatorname{erf}\sqrt{\frac{2}{R} \Lambda(z_\infty - z)} - \operatorname{erf}\sqrt{\frac{2}{R} \Lambda(z_\infty - H)} \right\}$$

Из формулы (II) следует, что увеличение скорости фильтрации газа, при прочих одинаковых условиях, ведет к снижению величины напряжений в твердом компоненте аэродисперсной системы и к уменьшению внешней силы, необходимой для создания предельного равновесного состояния на боковой поверхности данной системы.

Для практического использования формулы (II) необходимо экспериментальным путем установить связь между значением коэффициента  $\Lambda$  и величиной давления  $\sigma_{sz}$ , приложенного к основанию аэродисперсной системы.

В третьей главе приведены методики экспериментального исследования, целью которого являлась проверка основных предположений теоретического анализа и его конечных результатов, а также количественное определение зависимости коэффициентов  $\Lambda$  и  $K_{sl}$  от величины влияющих факторов. Экспериментальное исследование состояло из двух частей.

В первой части, исследование проводили на "структурированных" аэродисперсных системах, вертикальное перемещение которых осуществлялось за счет усилия, приложенного металлическим поршнем к основанию системы. Через пористую головку поршня в трубопровод подавали сжатый воздух, который фильтровался через поры в структуре твердого компонента. В головке поршня и на вертикальной поверхности трубопровода были установлены датчики для регистрации величины вертикального и горизонтального давлений, оказываемых со сто-

роны твердого компонента на ограждающие поверхности. Перед этой частью исследования ставили задачу определения качественного характера зависимости величины давлений  $\sigma_{sz} = \Phi(H, \omega)$  и  $\sigma_{sr} = \Phi(H, \omega)$ , оказываемых аэродисперсной средой на стенки трубопровода и поршень, в процессе ее сдвига вдоль ограждающей поверхности, а также установления количественной связи между коэффициентом  $\Lambda$  и величиной  $\sigma_{sz}$ .

Во второй части, исследования проводили на "псевдожидких" аэродисперсных системах. При помощи вертикального шнека осуществляли непрерывную подачу твердого компонента непосредственно в транспортный трубопровод, где производилась аэрация твердых частиц и их дальнейшее перемещение. Транспортный трубопровод, выполненный из прозрачного оргстекла, был подвешен к весоизмерительному устройству.

В задачи этой части эксперимента входило качественное определение зависимости величины силы  $F_{mf}$ , необходимой для перемещения аэродисперсной системы, и нахождение количественной зависимости величины коэффициента  $\xi = K_{sl}(m+1)$ , характеризующего распределение локальных значений скорости твердого компонента вдоль радиуса потока, от средних по сечению значений скоростей газовой среды и твердых частиц потока.

В качестве опытных материалов использовались продукты помола зерна и кормовые дрожжи гидролизного производства.

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования.

В части исследования "структурированных" аэродисперсных систем показано (рис. 2 и рис. 3), что высота  $H$  и скорость фильтрации газа оказывают значительное влияние на величину нормальных напряжений  $\sigma_{sz}$  и  $\sigma_{sr}$  в структуре твердого компонента.

Получена совокупность экспериментальных значений  $\Lambda = \Phi(\sigma_{sz})$ ,

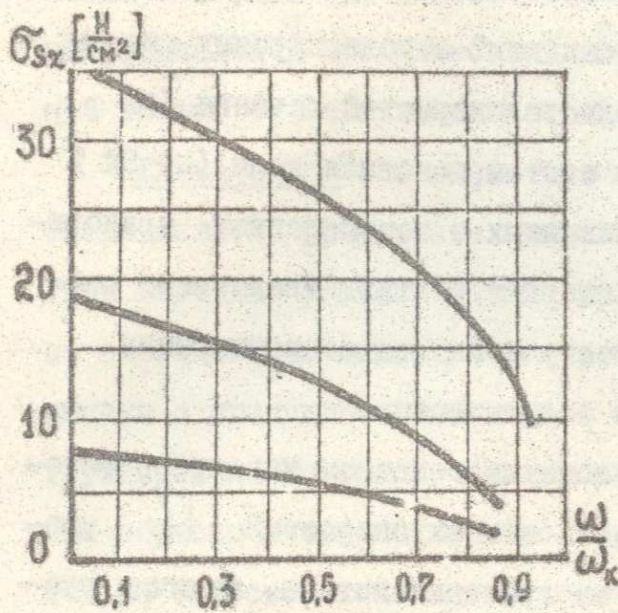


Рис. 2  
Зависимость давления  $\sigma_{sx}$  от величины отношения  $\omega/\omega_k$  для слоя крупной крупки.

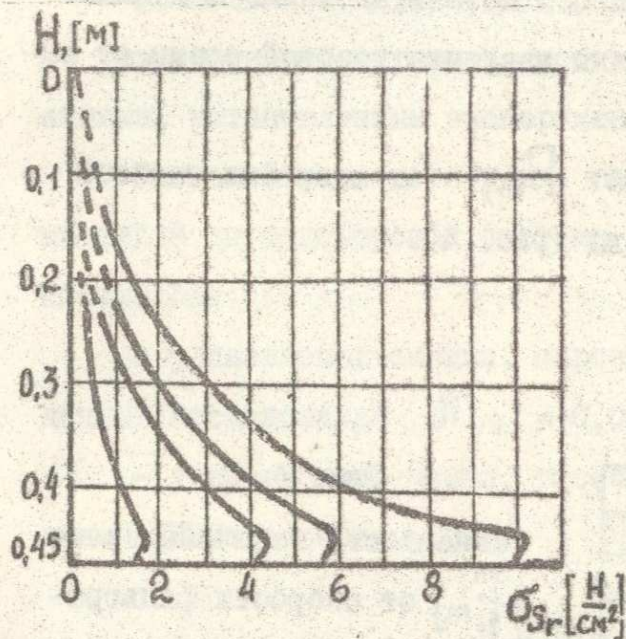


Рис. 3  
Зависимость давления  $\sigma_{sr}$  от высоты  $H$  для слоя средней крупки.  
1 -  $\omega = 0$ ; 2 -  $\omega = 0,0352$  м/с; 3 -  $\omega = 0,0546$  м/с; 4 -  $\omega = 0,0739$  м/с.

которые были аппроксимированы с помощью полинома Чебышева:

$$\Lambda = a + bt + c(2t^2 - 1) + d(4t^3 - 3t) \quad (12)$$

Преобразование исходной области изменения аргумента  $\sigma_L \leq \sigma_{sx} \leq \sigma_R$  где  $\sigma_R$  и  $\sigma_L$  - крайние значения аргумента проводил по формуле:

$$t(\sigma_{sx}) = \frac{2\sigma_{sx} - (\sigma_L + \sigma_R)}{\sigma_R - \sigma_L} \quad (13)$$

Относительная погрешность аппроксимации  $\delta \leq \pm 8,7\%$ .

В части исследования "псевдожидких" аэродисперсных систем показано, что в исследованной области скоростей течения (от 0,027 до 0,1  $\frac{M}{C}$ ) аэродисперсных систем, основная доля (от 94 % до 70 %) в общем балансе сил, связанных с перемещением, приходится на преодоление сил тяжести твердых частиц. Увеличение скорости транспортирования вело к росту доли сил сопротивления сдвигу  $F_{mf}$  и уменьшению доли сил тяжести.

Опытами подтверждены предположения о вязком характере течения аэродисперсных систем в области низких скоростей. И, наличие скольжения твердых частиц на границах потока, наличия градиента скорости вдоль радиальной оси потока, а также о нелинейном характере зависимости величины давления газовой среды от высоты перемещения.

Определена зависимость силы  $F_{mf}$  от скорости газовой среды относительно твердых частиц (рис. 4).

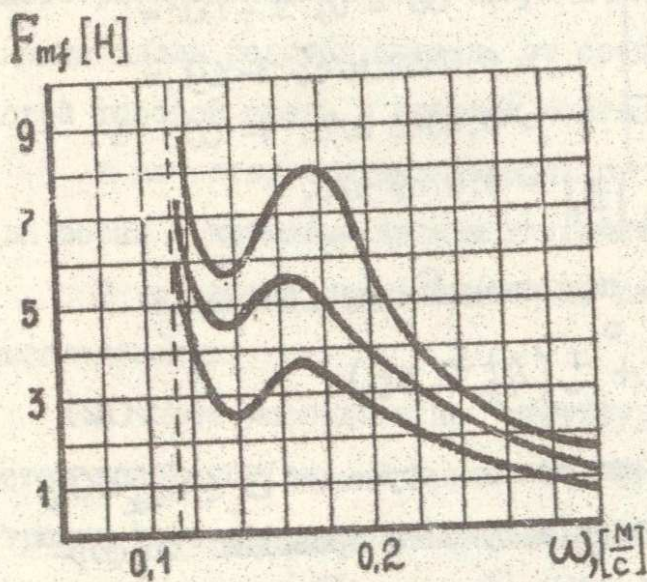


Рис. 4

Зависимость величины силы  $F_{mf}$  от скорости фильтрации газовой среды. (твердая составляющая потока - крупная крупка).

1-  $M_s = 0,386$  кг/с;

2-  $M_s = 0,235$  кг/с;

3-  $M_s = 0,135$  кг/с.

Проведенные на основании экспериментальных данных расчеты показали, что в исследованном диапазоне изменений скорости те-

СССН. 2.2.

чения и порозности (0,51...0,65) аэродисперсных систем величину коэффициента  $\delta$  практически ( $\delta \leq \pm 7,5\%$ ) можно считать зависящей только от механических свойств компонентов системы.

Глава пятая посвящена промышленной проверке результатов исследования. В результате проведенных исследований были разработаны методика расчета параметров течения аэродисперсных систем по вертикальным цилиндрическим каналам и конструкция пневмоподъемника с принудительным вводом сыпучего материала в транспортный трубопровод. На основе этих разработок был изготовлен промышленный образец пневмоподъемника, испытанный и принятый в эксплуатацию на Одесском комбинате пищевых концентратов.

Испытания показали, что результаты расчета, проведенного по разработанной методике, соответствуют параметрам пневмоподъемника, установленным экспериментально.

Удельный расход энергии, связанный с непосредственным перемещением аэродисперсной системы по транспортному трубопроводу составляет:

- у пневмоподъемника, спроектированного на основании проведенных исследований  $N_{уд} = 0,014 \frac{\text{кВт}\cdot\text{с}}{\text{кг}\cdot\text{м}}$  ;

- у пневмоподъемника, рассчитанного на основании рекомендаций ЦНИИпромзернопроекта  $N_{уд} = 0,03 \frac{\text{кВт}\cdot\text{с}}{\text{кг}\cdot\text{м}}$  .

## ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ процесса вертикального восходящего движения аэродисперсных систем с высокой концентрацией твердого компонента, в результате которого составлено математическое описание процесса и получена нормальная система уравнений динамики аэродисперсного потока для областей вязкого режима течения.

2. Рассмотрены два случая движения: "структурированных" и "псевдожидких" аэродисперсных систем. Расчетно-теоретическим

анализом получены формулы ( 6 ) и ( 8 ), на основании которых установлены функции локальных значений всех параметров аэродисперсного потока от его координат. Это позволяет, путем решения уравнений динамики, определять локальные и интегральные значения параметров аэродисперсного потока.

3. В результате анализа литературных источников получена формула ( 3 ) для определения коэффициента локальной "эффективной" вязкости аэродисперсной среды. Предложенная зависимость позволяет определить направление дальнейших исследований реологических свойств аэродисперсных систем, а также проводить обобщение результатов таких исследований.

4. Экспериментально установлено, что в исследованном диапазоне значений  $\bar{\epsilon} \in [0,53...0,68]$  и  $\bar{U}_0 \in [0,028...0,1]$  м/с величина коэффициента  $\mathcal{L} = K_{sp}(m+1)$  практически не меняется с изменением указанных выше параметров аэродисперсного потока. В связи с этим, коэффициент  $\mathcal{L}$  может служить константой, характеризующей процесс взаимодействия аэродисперсного потока со стенками трубопровода.

5. Экспериментально показано, что в области низких скоростей течения ( $\bar{U} \leq 0,1$  м/с) аэродисперсных систем процесс перемещения их характеризуется высокими значениями коэффициента полезного действия ( $\eta \approx 0,85...0,95$ ). Этот результат определяет направление дальнейших разработок в сфере проектирования устройств, использующих аэродисперсные потоки, особенно для случая, когда необходимы небольшие расходы твердого компонента.

6. Экспериментально показано, что применение принудительного ввода твердых частиц непосредственно в транспортный трубопровод в направлении движения потока позволяет осуществлять устойчивое перемещение аэродисперсных систем в широком диапазоне соотношений между массовыми расходами твердой и газовой составляющих.

Разработана конструкция такого питающего устройства, которое было использовано в лабораторной установке при проведении экспериментальных исследований, а также в промышленном пневмоподъемнике.

7. Проведенный комплекс аналитических и экспериментальных исследований позволил разработать методику расчета параметров вертикального движения аэродисперсных сред с высокой концентрацией твердого компонента. Разработанная методика использована при проектировании промышленного пневмоподъемника, производственные испытания которого показали:

а) результаты расчета соответствуют действительным параметрам установки;

б) удельная энергоёмкость процесса непосредственного перемещения груза в 2,1 раза ниже в сравнении с промышленным прототипом.

#### ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ, ИЗЛОЖЕННЫМ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Платонов П.Н., Коншин В.Н. Исследование процесса вертикального перемещения плотного слоя мелкодисперсного материала по трубопроводу. - В кн.: Материалы II Всесоюз. конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971, с. 61-62.
2. Платонов П.Н., Федоров Ф.А., Коншин В.Н. Влияние скорости фильтрации воздуха через слой мелкодисперсного материала на сопротивление проталкиванию его по трубам. - В сб.: Реф. инф. о законченных НИР в вузах УССР. Пищевая пром-сть. Киев, "Вища школа", 1974, вып. 9, с. 46-47.
3. Коншин В.Н. Влияние фильтрации газового потока на процесс перемещения сыпучих материалов по трубам способом проталкивания. - Инж.-физ. журн., 1975, т. 29, № 6, с. 1020-1023.
4. Коншин В. Определение величины сил трения двухкомпонентного потока при пневмотранспортировании. - Мукомольно-элеваторная и комбикормовая пром-сть, 1979, № 10, с. 27-28.

5. Коншин В.Н. Дифференциальные уравнения движения плотного аэродисперсного потока в потенциальном режиме течения. - В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюз. конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1980, с. 29-30.
6. Коншин В.Н., Канаев В.А. О распределении локальных значений параметров аэродисперсного потока. - В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюз. конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1980, с. 101.
7. Коншин В.Н., Каленов О.С. Определение условий, соответствующих началу течения аэродисперсной системы вдоль цилиндрической поверхности. - В кн.: Тезисы докладов IV Всесоюз. конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1980, с. 102.

Обозначения:  $C_w = W_s / W_g$  - объемная концентрация твердых частиц в потоке;  $E = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$  - коэффициент порозности;  $F$  - сила;  $\Phi$  - функциональная зависимость;  $g$  - ускорение свободно падающего тела;  $H$  - высота трубопровода;  $R_{sl}$  - коэффициент скольжения твердых частиц вдоль ограждающей поверхности;  $k_f$  - коэффициент фильтрации;  $k$  - коэффициент гидравлического сопротивления слоя при фильтрации газа;  $\alpha = 0,5 \frac{u_{sl}}{\bar{u} - u_{sl}}$  - опытный коэффициент;  $M$  - массовый расход;  $N$  - мощность;  $P$  - давление;  $R$  - радиус трубопровода;  $u$  - скорость твердых частиц;  $u_{sl}$  - скорость скольжения твердых частиц по стенке трубопровода;  $v$  - скорость газовой среды относительно трубопровода;  $\omega$  - скорость газа относительно твердых частиц;  $W$  - объем;  $\varepsilon$  - порозность аэродисперсного потока;  $\Lambda = \psi \operatorname{tg} \varphi \sigma$  - коэффициент, характеризующий сопротивление слоя сдвигу;  $M_e$  - коэффициент "эффективной" вязкости;  $\rho$  - плотность;  $\sigma$  - нормальные напряжения;  $\tau_T$  - касательные напряжения, соответствующие пределу текучес-

ти;  $\varphi_\sigma$  - угол внутреннего сдвига;  $\Psi = \sigma_{sr} / \sigma_{sz}$  - коэффициент пропорциональности;  $r, z$  - оси координат.

Нижние индексы:  $g$  - газ;  $s$  - твердая фаза;  $m$  - аэродисперсная система;  $\varphi$  - физическая;  $c, y$  - свободная укладка частиц;  $r, z$  - проекции вектора на соответствующую ось координат;  $(r), (z), (r, z)$  - функциональная зависимость величины от соответствующей координаты.

Верхние индексы:  $(\bar{\quad})$  - величина, усредненная по сечению потока.