

Автор ер.

№ 19

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО  
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

Одесский технологический институт пищевой  
промышленности им. М.В.Ломоносова

На правах рукописи

Аспирант В.А.Канаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВВОДА АЭРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ  
ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ КАМЕРНЫМ ПИТАТЕЛЕМ  
В МАТЕРИАЛОПРОВОД

Специальность 05175

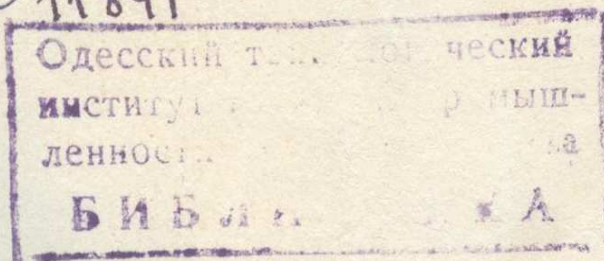
1987

Машины и аппараты пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

У.О. 11841



Одесса - 1971

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Домоносова

Научный руководитель – профессор, доктор технических наук  
П.Н.Платонов

Официальные оппоненты:

профессор, доктор физико-математических наук О.М.Тодес,

доцент, кандидат технических наук Г.Ф.Костюк

Ведущее предприятие – Управление хлебопекарной промышленности  
Министерства пищевой промышленности  
Молдавской ССР

Автореферат разослан "19 октября" 1971 г.

Защита диссертации состоится "19 ноября" 1971 г.  
на заседании Ученого Совета механического факультета Одесского  
технологического института пищевой промышленности им. М.В.Домоносова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

... присылать по адресу:

О Т И П П

Запожечен/

Пневматический транспорт сыпучих материалов, благодаря своим неоспоримым преимуществам, за сравнительно короткое время стал важным средством механизации производства почти во всех областях народного хозяйства.

Рост пищевой, строительной и металлургической промышленности вызвал резкое увеличение внутризаводской транспортировки зернистых и порошкообразных сыпучих материалов. В связи с этим проблема повышения экономичности пневматического транспорта приобретает первостепенное значение.

Одним из путей решения этой проблемы является повышение весовой концентрации движущегося в материалопроводе двухфазного потока. Наиболее перспективными транспортирующими системами, удовлетворяющими требованиям современного производства, являются пневмотранспортные установки с камерными питающими устройствами.

Интерес к камерным питателям вызван их существенными достоинствами: меньший расход энергии по сравнению с другими видами питателей; отсутствие движущихся частей; возможность транспортировки на значительные расстояния с большой производительностью; использование в качестве мобильных саморазгружающихся емкостей.

На сегодняшний день методы расчета пневмотранспортных установок высокой концентрации с камерными питателями затрагивают, в основном, вопросы движения аэросмеси в материалопроводе, расчета рабочих циклов камерного питателя и энергозатрат на перемещение сыпучего материала. При этом влияние непосредственно питающего устройства (его размеров, конструкции отдельных элементов) и воздухораспределительной системы на форми-

вание двухфазного потока на входе в материалопровод не нашло должного отражения.

В связи с этим, выполненные в настоящей работе экспериментальные исследования посвящены вопросам выяснения природы процессов, происходящих в камерном питателе при установившемся режиме работы и их влиянию на формирование и движение двухфазных потоков в материалопроводе. А полученные аналитические выражения, учитывают геометрические размеры основных конструктивных элементов камерного питателя в зависимости от физико-механических свойств составляющих потоков.

## Глава I. ПНЕВМАТИЧЕСКОЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ ПОТОКОМ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ УСТАНОВКАМИ С КАМЕР- НЫМИ ПИТАТЕЛЯМИ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.

Современные пневмотранспортные установки с камерными питающими устройствами представляют собой системы, состоящие из двух основных звеньев: питателя, в котором подготавливается, а затем вводится в транспортную систему твердая фаза, и материалопровода, принимающего из питателя двухфазный поток и направляющего его за счет энергии газовой фазы к месту разгрузки.

Подготовка и ввод двухфазного потока в материалопровод обусловлены процессами, связанными с фильтрацией газа через слой сыпучего материала в камерном питателе, переводом твердой фазы в подвижное состояние с последующим истечением двухфазного потока в материалопровод. В связи с этим целесообразно рассматривать эти процессы отдельно. Для анализа сложившихся взглядов рассмотрим исследования, выполненные в этой области, касающиеся основных звеньев пневмотранспортных установок: конструкции камерных питателей; процессов сопровождающих формирование двухфазного потока на входе материалопровода (фильтрацию газа через слой сыпучего материала, истечение псевдооживленного слоя из емкости) и движение двухфазного потока высокой концентрации в материалопроводе.

Для создания двухфазного потока в нагнетательных пневмотранспортных установках применяются в основном 3 типа питающих устройств: винтовые, шлюзовые и камерные.

Первые два типа питателей в силу целого ряда конструктивных особенностей не позволяют перемещать поток высокой концент-

рации на значительные расстояния.

Из всего многообразия конструкций камерных питателей, применяемых на практике, можно выделить две основные группы - питатели с верхней и нижней выдачей сыпучего материала в материалопровод. Анализ экспериментальных работ, выполненных ВНИИстройдормашем, ВНИИПТМашем и Ленгорминпроектом показал, что наиболее эффективная выгрузка пневморезурвуаров по производительности и энергозатратам достигается при верхнем способе выдачи сыпучего материала.

Предложенная впервые в СССР ВНИИПТМашем новая конструкция бесфорсуночного камерного питателя позволила разработать ряд камерных питателей, осуществляющих перемещение сыпучего материала с высоким коэффициентом концентрации 100+400 кг/кг. Успешно ведутся научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы по дальнейшему совершенствованию питающих устройств с целью повышения экономичности ПГУ.

Здесь представляется возможным выделить три основные направления: 1) осуществление непрерывности работы пневмотранспортных установок с камерными питателями; 2) совершенствование конструкции газораспределительных и аэрирующих устройств; 3) создание питателей с оптимальными геометрическими размерами и совершенной конструкцией входной зоны материалопровода.

Основной недостаток камерного питателя - периодичность действия компенсируется применением автоматизированных двухкамерных питателей; разработанных ВНИИПТМашем. Известны конструкции однокамерных питателей непрерывного действия, однако широкого промышленного применения они не нашли.

Большое влияние на характер формирования двухфазного по-

тока на входе материалопровода оказывает конструкция аэрирующего днища. Работы, проведенные в этом направлении советскими и зарубежными исследователями позволили создать конструкции аэрирующих перегородок, позволяющих приводить в подвижное состояние большинство порошкообразных сыпучих материалов.

Значительно меньшее количество исследований проведено над совершенствованием конструкции входной зоны материалопровода; выяснением влияния способов подачи воздуха в питатель и его геометрических размеров на экономичность работы пневмотранспортной установки.

Анализ методов расчета пневмотранспортных установок с камерными питателями (работы Гаспаряна А.М., Малиса А.Я., Разумова И.М., Ривкина М.Б., Сегаля И.С., Смолдырева А.Е. показывает, что предлагаемые аналитические зависимости описывают движение аэрированных потоков непосредственно в материалопроводе. Из конструктивных элементов подлежат расчету только внутренний диаметр материалопровода и параметры системы пылеочистки. Последние работы Смольского С.И. посвящены процессам, происходящим в пневморезервуарах в период предварительного нагнетания, а исследования в конечном итоге сводятся к расчету параметров пористых перегородок.

Вопросу фильтрации жидкости и газа сквозь стационарный зернистый слой посвящено большое количество исследований. Их подробное обобщение приведено в ряде монографий: А.Э.Аэрова, и О.М.Тодеса, С.С.Забродского, Л.С.Лейбенсона, И.С.Разумова и др.

Многие авторы рассматривают фильтрацию, как течение жидкости в каналах между частицами; другое направление основано на

данных по обтеканию отдельных твердых частиц потоком жидкости или газа. С другой стороны О.М.Тодес рассматривает аэродинамику неподвижного зернистого слоя, как совместную задачу (течение жидкости сквозь стационарный зернистый слой представляет собой одновременно и внутреннюю и внешнюю задачу).

В последнее время широкое распространение получили двучленные интерполяционные формулы, которые развивались и проверялись в работах советских и зарубежных авторов. Предложенную Эргуном двучленную зависимость выгодно отличает от всех описанных формул то обстоятельство, что для её применения достаточно знать лишь основные характеристики потока и сыпучего материала.

В процессе подготовки сыпучего материала в камерном питателе для его последующего транспортирования в материалопровод, значительную роль играет формирование двухфазного потока на входе в материалопровод. Процесс входа двухфазного потока в материалопровод можно рассматривать, как процесс, аналогичный истечению псевдооживленного слоя сыпучего материала через отверстия в стенке сосуда.

Наиболее полно процесс истечения аэрированного сыпучего материала исследован Л.Массимилла с сотрудниками. На основе анализа размерностей групп и обобщения обширного экспериментального материала ими была предложена зависимость, связывающую расход сыпучего материала с перепадом давления в ёмкости.

Учитывая сказанное, представляется возможным уточнить и конкретизировать цели исследования, формулируя их в виде следующих задач:

- исследовать процесс ввода двухфазного потока высокой концентрации камерным питателем в материалопровод при установившемся режиме транспорта пылевидных и зернистых сыпучих материалов ;

- предложить рабочую модель процесса ввода двухфазного потока камерным питателем в материалопровод ;

- выявить влияние способа подачи воздуха в камерный питатель на экономичность работы пневмотранспортной установки ;

- исследовать влияние положения материалопровода относительно днища питателя и конструкции входа в материалопровод ;  
на экономичность работы пневмотранспортной установки ;

## Глава II. ПРОЦЕССЫ В КАМЕРНОМ ПИТАТЕЛЕ.

Современные пневмотранспортные установки с камерными питающими устройствами представляют собой системы, состоящие из двух основных звеньев: питателя, в котором подготавливается, а затем вводится в систему твердая фаза; и материалопровода, принимающего из питателя двухфазный поток и направляющего его за счет энергии газовой фазы к месту разгрузки.

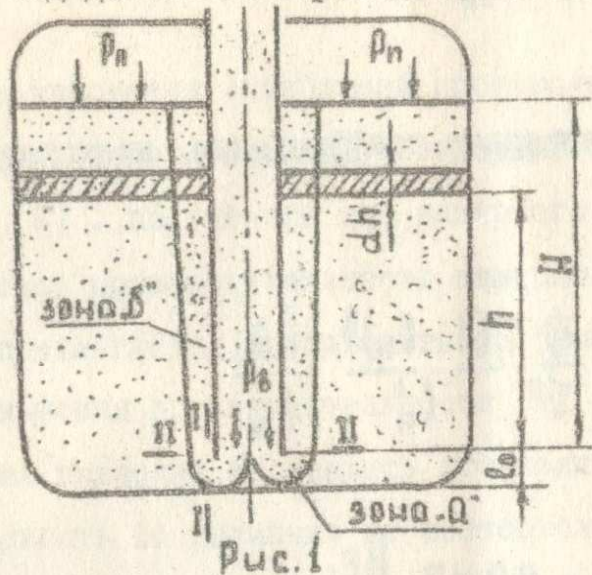
Подготовка и ввод двухфазного потока в материалопровод обусловлены процессами, связанными с фильтрацией газа через слой сыпучего материала в камерном питателе, переводом твердой фазы в подвижное состояние с последующим истечением двухфазного потока в материалопровод.

Процесс подачи частиц сыпучего материала, формирование двухфазного потока рассматривается в случае загруженного материалопровода при следующих условиях:

- двухфазный примоточный поток сыпучий материал - воздух в камерном питателе неразрывен;
- скорость частиц и воздуха, объемная концентрация, давление в сечениях I-I и II-II равны между собой (рис. I);
- сыпучий материал в районе входа в материалопровод находится в псевдоожженном состоянии.

Сделанные предположения позволяют выдвинуть следующую рабочую модель: "формирование двухфазного потока на входе в материалопровод камерного питателя представляют собой истечение псевдоожженного слоя сыпучего материала из емкости через отверстие в систему с постоянным уровнем (в загруженный матери

алопровол.) под действием перепада давления".



Принимая это положение, можно для определения производительности камерного питателя воспользоваться формулой Л.Массимилла, представив её в виде:

$$G_m = \psi \frac{\gamma_m \Phi d_n^2}{4} \sqrt{\frac{\Delta p_n g \Phi}{\gamma_m}} \quad (1)$$

Для определения перепада давления в питателе воспользуемся формулой Эргуна:

$$\Delta p_n = 150 \frac{(1 - \epsilon_n)^2}{\epsilon_n^3} \frac{\nu \rho H \omega \varphi}{d_n^2} + 1,75 \frac{1 - \epsilon_n}{\epsilon_n^3} \frac{\rho H \omega \varphi^2}{d_n} \quad (2)$$

Решив совместно выражения (1) и (2), представляется возможным получить зависимость, связывающую производительность камерного питателя с высотой сыпучего материала в нём с помощью основных физико-механических свойств составляющих потоков.

$$G_m = \frac{\gamma_m \Phi \left[ \sqrt{\epsilon_n^2 (0,5 + \nu \theta_0) \left( \frac{\nu \rho^2}{\psi^2 a g H} - \epsilon_n^2 \theta_0 \right) (1 + \theta_0)} - \epsilon_n (0,5 + \nu \theta_0) \right]}{\frac{\nu \rho}{\psi^2 a g H} - \frac{\epsilon_n^2 \theta_0}{\nu \rho}} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta_0$  безразмерные коэффициенты, представленные в критериальной форме.

$$\alpha = 150 \frac{\phi}{\pi^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon_n)^2}{\epsilon_n^3} \frac{Re_1}{Az} \quad (4)$$

$$\beta_0 = 0,0117 \frac{Re_1}{1 - \epsilon_n} \quad (5)$$

Полученная зависимость (3) справедлива для постоянной высоты  $H$  сыпучего материала в камерном питателе.

В настоящее время в промышленности в основном применяются камерные питатели циклического действия, т.е. в процессе разгрузки высота  $H$  слоя сыпучего материала в нем непрерывно уменьшается.

На основании рабочей модели, представленной на рис. I, получено выражение (6), определяющее производительность камерного питателя при непрерывно уменьшающейся высоте сыпучего материала в нем:

$$G_n = \frac{S_n H \gamma_n \epsilon}{4 \sqrt{\epsilon_n^2 (\alpha_1 + \beta_0)^2 + \left( \frac{U_8^2}{\psi^2 a g h} - \epsilon_n^2 \beta_0 \right) (1 + \beta_0) - \epsilon_n (\alpha_1 + \beta_0)}} \left( \frac{U_8}{\psi^2 a g h} - \frac{\epsilon_n^2 \beta_0}{U_8} \right) dh \quad (6)$$

С целью упрощения вычислений производительности камерного питателя циклического действия, необходимо сравнить выражение (6) с выражением (3), полученным для камерного питателя непрерывного действия. Расчет производительности камерного питателя циклического действия предлагается производить по формуле (3) с учетом коэффициента уменьшения производительности  $\Lambda$ . Анализ экспериментальных данных позволил определить его величину  $\Lambda = 1.71$ .

Если принять во внимание то обстоятельство, что сечение I-I рис. 1 находится в непосредственной близости от сечения II-II, то можно предположить, что объемные концентрации в данных сечениях равны. Тогда, из условия равенства площади образующей цилиндра диаметром  $d_T$  и площади поперечного сечения материалопровода, представляется возможным определить оптимальное расстояние  $l_0$  от днища:

$$l_0 = \frac{d_T}{4\Phi} \quad (7)$$

Для сыпучего материала с формой отличной от шаровой в знаменатель формулы (7) вводится фактор формы  $\Phi$ .

### Глава III. Экспериментальные исследования установок с камерным питателем. Методика исследования.

Основными характеристиками и свойствами сыпучего материала, определяющими его способность к пневматическому транспортированию, являются: гранулометрический состав, удельный и насыпной вес, способность к аэрации, влажность, сыпучесть, слеживаемость и т.д.

Поведение сыпучих материалов непосредственно в камерном питателе диктует выбор его конструкции (например, при пневматическом транспортировании порошкообразный сыпучих материалов применяются камерные питатели с аэрационным устройством).

Для сравнения процессов, происходящих в камерном питателе с сыпучими материалами и выдачи рекомендаций по конструкции питателя и режимам, определяющим минимальную энергоемкость, для опытов были выбраны зернистые и порошкообразные сыпучие материалы. Зернистые - пшеница, пентаэритрит; порошкообразные - кормовые дрожжи, портланд-цемент марки 500, пробковая мука.

Для проверки основных положений рабочей модели процессов, происходящих в камерном питателе и полученных аналитических выражений, было проведено экспериментальное исследование на лабораторной пневмотранспортной установке по транспортировке исследуемых сыпучих материалов при высоких концентрациях.

Отличительной особенностью экспериментальной установки является наличие двух поочередно работающих камерных питателей, один из которых предназначен для визуального наблюдения за процессами в нем происходящими, другой - предназначен для снятия количественных характеристик.

Камерный питатель, предназначенный для визуального наблюдения представляет собой модель, в переднюю прозрачную стенку которого вмонтирован разрезанный транспортный материалопровод.

К пневмотранспортной установке предъявлены и соблюдены следующие требования:

1) Возможность визуального наблюдения за процессами, происходящими непосредственно в камерном питателе и на входе в материалопровод;

2) Универсальность при реализации способа подачи воздуха в камерный питатель (сверху, снизу через аэрирующее днище и одновременно снизу и сверху);

3) Создания широкого диапазона скоростей частиц сыпучего материала в материалопроводе (Скорости воздуха измерялись с помощью ротаметров в диапазоне  $0,25-13$  м/сек);

4) Изменение расстояния материалопровода от днища;

5) Изменение конструкции входной зоны материалопровода применением сменных насадок и обтекателя.

Давление и перепады давления измерялись с помощью соответственно манометров и дифманометров. Производительность - с помощью циферблатных весов и секундомера. Объемная конструкция твердой фазы - с помощью электронного прибора емкостного типа, разработанный на кафедре автоматизации производственных процессов.

При экспериментальных исследованиях пневматического транспорта сыпучих материалов возникает необходимость в получении непрерывной информации об объемной концентрации движущихся в материалопроводе частиц. Существующий метод "мгновенных отсечек" не позволяет количественно охарактеризовать качество (степень неоднородности) движущегося двухфазного потока и получить усредненное значение объемной концентрации в течение всего рабочего цикла пневмотранспортировки.

Накопленный опыт в измерении плотности и степени неоднородности псевдоожиженного слоя позволяет получить непрерывную информацию об изменении этих характеристик с помощью различных экспериментальных методов. Эти методы основаны на измерении перепада давлений, поглощения рентгеновских и гамма лучей, емкости измерительного конденсата и др.

Применительно к пневматическому транспорту известны работы, позволяющие с помощью радиоактивных изотопов измерять скорость отдельной частицы.

В работах НИИИЗа описан прибор, позволяющий с помощью бета-излучения определять концентрацию зернопродуктов в пневмотранспортных трубах. Однако, область его применения ограничена низкими весовыми концентрациями  $M = 3$  кг/кг.

К достоинствам предложенного в данной работе метода и прибора по сравнению с существующими следует отнести простоту и возможность измерять высокую объемную концентрацию.

Метод измерения основан на изменении емкости измерительного конденсатора в зависимости от количественного содержания в его объеме исследуемого сыпучего материала.

Конструкция измерительного конденсатора обеспечивает сохранение структуры движущегося аэрированного потока, герметичность установки и независимость выходного сигнала от внешних воздействий на измерительный конденсатор.

Измерительный конденсатор состоит из корпуса с вклеенными в него металлическими пластинами. С помощью муфт корпус соединяется с материалопроводом пневмотранспортной установки. Рабочая частота прибора, на которой наблюдается наибольшая чувствительность к изменению весового содержания сыпучего материала в объеме измерительного конденсатора -  $f = 35$  мГц - выбрана, исходя из электрофизических свойств транспортируемого материала. С помощью штырьков измерительный конденсатор присоединяется непосредственно к генератору высокой частоты. При изменении емкости измерительного конденсатора (в случае, когда в его рабочем объеме находится аэрированный поток) изменяется частота собственных колебаний генератора. Индикатором изменения частоты генератора служит частотный дискриминатор, который дает на выходе постоянное напряжение; величина напряжения пропорциональна величине ухода частоты.

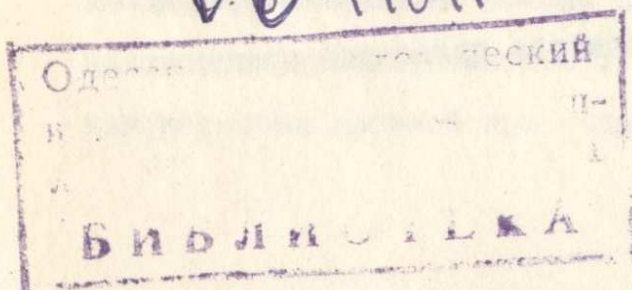
Градуировка выходного сигнала непосредственно в значениях объемной концентрации производилась последовательной засыпкой сыпучего материала известного веса  $\pi G$  в рабочую зону измерительного конденсатора. Объем рабочей зоны  $V_0$  определялся введением металлических сеток в измерительный конденсатор до отклонения стрелки вольтметра от нулевого положения. С помощью воздуха, подаваемого через нижнюю сетку, сыпучий материал распределяется по всему рабочему объему измерительного конденсатора. Верхняя сетка предотвращает вынос частиц материала из измерительного конденсатора.

Объемная концентрация расширенного по объему  $V_0$  слоя сыпучего материала весом  $G$  определялась с помощью зависимости:

$$B = \frac{\pi G}{G_0} B_n \quad (8)$$

Для получения мгновенных колебаний плотности движущейся твердой фазы производилась запись пульсаций выходного сигнала на шлейфный осциллограф Н700. Прибор позволял получать надежные показания, начиная со значений объемной концентрации, равной 0,08 мЗ/мЗ. Температура сыпучего материала в процессе градуировки и эксперимента составляла  $(14 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Влажность сыпучих материалов контролировалась перед началом эксперимента и оставалась постоянной.

V.B. 11841



#### Глава IV . ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРНОМ ПИТАТЕЛЕ НА КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПНЕВОТРАНСПОРТНОЙ УСТАНОВКИ.

Визуальное наблюдение в прозрачной модели показало, что движение сыпучего материала к входу в материалопровод камерного питателя при подаче воздуха сверху происходило только вдоль внешнего периметра материалопровода зона "а" (рис. I). Во время движения сыпучего материала в зоне "а" происходило незначительное увеличение пористости  $\xi$  по сравнению с пористостью  $\xi_m$  сыпучего материала в насыпи.

При подходе частиц сыпучего материала к входу в материалопровод, вследствие увеличения скорости фильтрации воздуха в районе зоны "б", сыпучий материал переходит в псевдооживленное состояние. Увеличение скорости фильтрации в районе зоны "б" происходит вследствие уменьшения площади фильтрации. Наличие зоны "б" подтверждает предложенную рабочую модель об истечении псевдооживленного слоя из камерного питателя в материалопровод.

Наблюдение за движением зернистых сыпучих материалов непосредственно в материалопроводе показало, что транспорт начинался с образования поршней, что подтверждается полученными осциллограммами пульсаций объемной концентрации. Таким образом, движение твердой фазы компактным "плотным слоем" не наблюдалось. С повышением скорости воздушного потока пульсации плотности уменьшаются.

У порошкообразных сыпучих материалов транспорт начинается с образования сгустков частиц, что вызвало резкие пульсации объемной концентрации. При увеличении скорости воздуха пульсации выравнивались и в дальнейшем амплитуда пульсаций практиче-

ски не менялась.

При исследовании влияния способа подачи воздуха в камерный питатель при транспортировке зернистых сыпучих материалов сравнивались два варианта подачи - сверху и снизу при неизменной насадке материалопровода.

Анализ экспериментальных данных при пневмотранспорте зернистых сыпучих материалов показывает, что при подаче воздуха в камерный питатель сверху производительность пневмотранспортной установки выше, чем при подаче воздуха снизу. Следствием роста производительности является рост скорости частиц на входе в материалопровод, так как объемная концентрация при этом оставалась практически постоянной, т.е. происходило падение скорости скольжения.

При транспортировке порошкообразных сыпучих материалов (кормовые дрожжи, цемент, пробковая мука) при подаче воздуха сверху вокруг материалопровода образовывалась воронка. Остаток сыпучего материала в камерном питателе при этом достигал 50-60% от общего количества. Угол наклона образующей воронки соответствовал углу наклона свободной поверхности при обрушении, который для данных сыпучих материалов был равен 70-90%. Поэтому, в первом приближении поведение сыпучего материала непосредственно в камерном питателе представляется возможным судить по наличию угла наклона свободной поверхности при обрушении. Ввиду этого, для данных сыпучих материалов, с целью разрушения воронки вокруг материалопровода, необходимо некоторое количество воздуха подавать снизу через аэрирующее днище. При одинаковых скоростях воздушного потока на входе в материалопровод максимальная производительность и объемная концентрация получена для кормовых дрожжей при подаче воздуха  $\frac{100Q_1}{Q_1 + Q_2} = 30\%$  от общей

подачи воздуха в камерный питатель; для пробковой муки - 60%; для цемента - 80%.

Наблюдения за характером входа двухфазного потока в материалопровод в прозрачной полумеди показали, что при цилиндрической конструкции входа материалопровода (без насадки) происходит инверсия (сужение) двухфазного потока к центру материалопровода. Инверсия двухфазного потока наблюдалась при скорости воздуха, начиная с 2,5 м/сек и выше.

У порошкообразных сыпучих материалов, ввиду того, что исследуемый диапазон скоростей воздуха был ниже  $U_{\text{к}} = 2,5$  м/сек, изменение конструкции входа в материалопровод не влияло на производительность.

С ростом скорости воздуха инверсия двухфазного потока на входе растет. У зернистых сыпучих материалов оптимальная скорость воздуха значительно превышала минимальную скорость образования инверсии; и рост производительности и весовой концентрации с установкой насадки в виде шарового коллектора для исследуемых сыпучих материалов составлял 10-100%.

Установка конусной насадки на вход материалопровода влияния на рост производительности не оказала.

Проведенные эксперименты позволили вывести зависимость для наружного диаметра шарового коллектора:

$$d_k = 2,5 d_r \quad (9)$$

Выбор оптимального расстояния входа материалопровода от дна камерного питателя должен обеспечить минимальный остаток сыпучего материала в камерном питателе без уменьшения производительности пневмотранспортной установки.

Экспериментальные данные подтвердили аналитическое выражение (7). При этом, с уменьшением расстояния по сравнению с выражением (7) наблюдалось падение производительности и весовой концентрации. Это обстоятельство объясняется тем, что площадь поперечного сечения I-I при уменьшении расстояния  $l_a$  становится меньше площади поперечного сечения материалопровода. При увеличении расстояния  $l_a$  по сравнению с расстоянием, предложенным по формуле (7), также наблюдается падение производительности.

Качественный анализ пульсационных кривых плотности, полученных с помощью электронного плотномера показывает, что нижний предел существования транспорта "плотным слоем" характеризуется высокой степенью турбулентных пульсаций плотности потока - образованием и разрушением поршней, движением сгустков частиц. Высокие скорости скольжения, являющиеся следствием неустановившегося движения частиц делают данный вид транспорта энергетически невыгодным. С ростом расхода воздуха амплитуда пульсаций сокращается, движение частиц приобретает более устойчивый характер и энергоемкость падает. К сокращению турбулентных пульсаций ведет правильный выбор расстояния  $l_a$ , определяющееся зависимостью (7).

Сравнительный анализ энергетических характеристик, полученных при пневматическом транспорте зернистых сыпучих материалов показывает, что максимуму объемной концентрации не соответствует максимум весовой концентрации. Это обстоятельство объясняется тем, что при малых скоростях воздуха происходит образование сгустков и пакетов частиц, являющееся **причиной** повышенных скоростей скольжения. При достижении определенных скоростей воздуха наступает минимум энергоемкости. При дальнейшем увеличении скорости воздуха падение объемной концентрации превалировало над ростом скорости частиц и энергоемкость росла.

Порошкообразные сыпучие материалы характеризуются значительными по величине силами сцепления между частицами, следствием чего является образование воронки вокруг материалопровода. При этом минимум энергоемкости достигается в случае подачи воздуха снизу в процентном отношении к общему количеству воздуха, подаваемого в камерный питатель, соответственно для кормовых дрожжей - 30%, пробной муки - 60%, цемента - 80%.

Изменение производительности камерного питателя в зависимости от способа подачи воздуха, изменения конструкции насадки материалопровода учитывается в формуле (6) коэффициентом  $\Psi$ . Эмпирическая зависимость коэффициента  $\Psi$  от скорости скольжения и критерия Архимеда получена способом наименьших квадратов:

$$\Psi = \left( \frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \left( \frac{0,514 R_2}{10^5} + 1,45 \right)^2 \quad (10)$$

Контрольные испытания были проведены на Одесском лакокрасочном заводе, на созданной по рекомендациям данной работы промышленной пневмотранспортной установке.

При сравнении величин производительности вычисленных по формуле (3) и полученных на промышленной установке не превышали +15,0-16,3%.

Результаты представленной работы позволяют сделать выводы:

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

I. Предложена и подтверждена опытом физическая модель процессов, происходящих в камерном питателе при подаче воздуха сверху, на основании которой выведена зависимость, связывающая с помощью критериев Рейнольдса  $Re_1$  и Архимеда  $R_2$  производительность пневмотранспортной установки  $G_m$  с высотой  $H$  сыпуче-

го материала в камерном питателе.

2. Разработанный электронный высокочастотный прибор (плотномер) емкостного типа позволяет получать надежные показания усредненной объемной концентрации и ее мгновенные отклонения при условии сохранения в процессе экспериментов постоянства температуры в пределе  $\Delta t^{\circ} = \pm 5^{\circ}\text{C}$  и влажности  $\Delta W = \pm 1\%$ , во всем диапазоне существования движущегося потока высокой концентрации. Нижний предел измерения объемной концентрации  $\epsilon'$ , обеспечивающий точность  $\pm 5\%$ , соответственно равен: для пшеницы  $\epsilon' = 0,06 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; пентаэритрита  $\epsilon' = 0,08 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ; кормовых дрожжей  $\epsilon' = 0,105 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . С увеличением концентрации двухфазного потока точность измерений возрастает.

3. Сравнение количественных параметров показывает, что режим движения двухфазного потока, соответствующий минимуму энергоемкости, наступает при скоростях воздуха, значительно превышающих скорости начала транспорта "плотным слоем".

4. Подача воздуха в камерный питатель сверху обеспечивает наиболее полное использование перепада давления  $\Delta P_a$  в питателе, как движущий фактор, создающий определенную скорость частиц на входе в материалопровод и ведет к снижению энергоемкости при транспортировке зернистых материалов по сравнению с подачей воздуха снизу на 5-15%. Порошкообразный сыпучий материал, характеризующийся углом наклона свободной поверхности при обрушении, обладает повышенной степенью связанности. Подача определенного количества воздуха снизу через аэрирующее днище уменьшает степень связанности сыпучего материала в камерном питателе и ведет к повышению экономичности пневмотранспортной установки. Расход воздуха, подаваемого снизу, в процентах от

общего расхода, определяется физико-механическими свойствами сыпучего материала и колеблется от 30 до 80%. Энергоемкость при этом по сравнению с подачей воздуха снизу снижается на 12+23%.

5. Конструкция входного устройства в виде шарового коллектора с обтекателем устраняет инверсию двухфазного потока на входе в материалопровод, начинающуюся при скоростях воздуха свыше 2,5 м/сек, что ведет к снижению энергоемкости по сравнению с конической и цилиндрической конструкцией входа. С ростом  $U_в$  растет эффект снижения энергоемкости, который при скоростях воздуха  $U_в = 8-10$  м/сек достигает 100%. Диаметр шарового коллектора выбирается в зависимости от диаметра материалопровода  $d_k = 2,5 d_r$ .

6. Выбором оптимального расстояния входа материалопровода от днища  $l_0 = \frac{d_r}{4\phi}$  при минимальном остатке сыпучего материала в питателе достигается: увеличение скорости частиц на входе; сокращение амплитуды турбулентных пульсаций плотности.

7. Исследования, проведенные на лабораторной и промышленной пневмотранспортных установках показали, что предложенный метод расчета геометрических размеров камерного питателя и его основных конструктивных элементов позволяет повысить экономичность пневмотранспортных систем.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a, b_0$  - безразмерные коэффициенты;

$d_k$  - наружный диаметр шарового коллектора /м/;

$d_r$  - внутренний диаметр материалопровода /м/;

$d_3$  - эквивалентный диаметр частиц /м/;

$G_m$  - весовая производительность пневмотранспортной установки /кг/сек/;

- $g$  - ускорение силы тяжести /м/сек<sup>2</sup>/ ;
- $H$  - высота стационарного слоя сыпучего материала в камерном питателе /м/ ;
- $L_0$  - расстояние входного устройства материалопровода от дна /м/ ;
- $U_0$  - абсолютная скорость воздуха на входе, отнесенная к полной площади поперечного сечения материалопровода **St** /м/сек/ ;
- $\omega_{\phi}$  - скорость фильтрации относительно частиц, движущихся в камерном питателе /м/сек/ ;
- $\gamma_m$  - удельный вес сыпучего материала /кг/м<sup>3</sup>/ ;
- $\Xi$  - объемная концентрация на входе в материалопровод /м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>/ ;
- $\xi_m$  - пористость сыпучего материала в свободной засыпке ;
- $\lambda$  - коэффициент уменьшения производительности ;
- $\nu$  - кинематическая вязкость воздуха /м<sup>2</sup>/сек/ ;
- $\rho$  - плотность воздуха /кг.сек/м<sup>2</sup>/ ;
- $\Delta p_n$  - перепад давления по высоте **H** сыпучего материала в камерном питателе /кг/м<sup>2</sup>/ ;
- $\Phi$  - фактор формы ;
- $Re_1$  - критерий Рейнольдса, базирующийся на абсолютной скорости воздуха  $U_0$  на входе в материалопровод.

Список работ, опубликованных  
по содержанию диссертации:

1. Платонов П.Н., Веремеенко Е.И., Федоров Ф.А., Канаев В.А., Коншин В.К., Шумишин В.В. К вопросу выгрузки цемента из камерных насосов. Журнал "Строительные и дорожные машины", № 6, 1970.
2. Канаев В.А., Платонов П.Н., Федоров Ф.А. Исследование процессов в камерном питателе при формировании потока высокой концентрации на входе в материалопровод. Труды "Транспортировка и хранение кормовых дрожжей", ВНИИсинтезбелок, М., 1970.
3. Платонов П.Н., Канаев В.А. и др. Измерение плотности твердой фазы высокой концентрации емкостным методом при пневматическом транспорте. Тезисы докладов "Расчет, конструирование и исследование оборудования производства источников тока", "Энергия", М., 1970.
4. Платонов П.Н., Канаев В.А. Неоднородность плотности твердой фазы при пневматическом транспорте высокой концентрации. ЦНИИТЭИ "Автоматизация производственных процессов", М., 1971.
5. Платонов П.Н., Канаев В.А. Влияние конструктивных параметров камерного питателя на экономичность работы пневмотранспортных установок. Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих сред", Одесса, 1971.

Результаты работы докладывались на научно-технических конференциях ОТИ им. М.В.Ломоносова в 1969 и 1971 г.г., на Всесоюзной отраслевой научной конференции в г.Одессе в 1970 г., на совместном заседании кафедр ОТИШ им. М.В.Ломоносова "Промышленная вентиляция", "Автоматизация производственных процессов" и "ПТМ и элеваторно-складского хозяйства" в 1971 г.

192 Подписано к печати 15.10.71г.

5234 Тир. 200 Об"ем 4 п. л. Уч.-изд. 4

ская городская типография Управления по печати.

а,49