

Автореф.
К 42

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

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

На правах рукописи

КОСТЮК Георгий Федорович
кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВЗВЕСЕНЕСУЩИХ
ПОТОКОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
(применительно к зерноперерабатывающим и
пищевым предприятиям)

Специальность 05.02.14
(Машины и агрегаты пищевой промышленности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
У С С Р

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

На правах рукописи

КОСТЮК Георгий Федорович
кандидат технических наук, доцент

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ ВЗВЕСЕНЕСУЩИХ
ПОТОКОВ РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
(применительно к зерноперерабатывающим и
пищевым предприятиям)

Специальность 05.02.14

(Машины и агрегаты пищевой промышленности)

Переучет 19.87

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

1012279

Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова
Б И Б Л И О Т Е К А

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

Научный консультант – доктор технических наук,
профессор А.М. ДЗЯДЗИО.

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор М.П.КАЛИНУШКИН,
доктор технических наук, профессор А.Ф.МИЛЕТИЧ,
доктор технических наук, профессор П.Н.ПЛАТОНОВ.

Ведущая организация – ордена Трудового Красного

Знамени ЦНИИПромзернопроект

Автореферат разослан *19 декабря* 1974 г.

Защита состоится *29 марта* 1974 г. на
заседании Ученого совета Одесского технологического
института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библио-
отеке института.

Просим отзывы в двух экземплярах направлять
по адресу: 270039, г.Одесса, ул. Свердлова, 112,
Технологический институт пищевой промышленности
им. М.В.Ломоносова.

Ученый секретарь Совета к.т.н. Л.А.Запорожец

План развития народного хозяйства СССР в Девятой пяти-
летке предусматривает довести в 1975 году среднегодовой
сбор зерна до 195 млн тонн, производство минеральных удоб-
рений до 90 млн тонн, цемента до 122-127 млн тонн. На мно-
го увеличивается выпуск других зернистых, пылевидных и во-
локнистых материалов.

В Директивах XXIV съезда КПСС указано на необходи-
мость значительно расширить применение в народном хозяйст-
ве СССР пневматического и гидравлического транспорта как
прогрессивного и наиболее полно отвечающего условиям осу-
ществления комплексной механизации и автоматизации произ-
водственных процессов.

Технически и экономически особенно целесообразно совме-
щение аэро либо гидравлического перемещения материала в
производствах, в которых воздушные потоки (жидкость) осу-
ществляют попутную классификацию смесей на основе исполь-
зования различий в скоростях витания частиц. Такие процес-
сы широко применяют на зерноперерабатывающих и пищевых
предприятиях.

Научно-экспериментальные исследования, проведенные
во ВНИИЗ, ЦНИИПромзернопроекте, МТИП и ОТИП позволяют с
достаточной для практических целей точностью проектировать
пневмотранспортные системы для зерноперерабатывающих пред-
приятий. Разработанные ЦНИИПромзернопроект и ВНИИЗ ука-
зания по расчету пневматического и аэрозольного транспор-
та (1971 г) являются в настоящее время основным руковод-
ством по проектированию, наладке и эксплуатации таких ус-
тановок.

Технико-экономические преимущества пневмотранспорта на зерноперерабатывающих предприятиях привели к значительным темпам его внедрения в размольных и зерноочистительных отделениях мельниц. Так, например, только по РСФСР в 1956 г на пневмотранспорте работало 6 мельниц общей производительностью 800 т/сутки. К 1971 году число мельниц, работающих на пневмотранспорте возросло до 116 общей производительностью 27300 т/сутки, а в 1973 году эти цифры составляли 133 и 30982 т/сутки. К концу 1975 года количество предприятий Министерства Заготовок СССР работающих на пневматическом транспорте достигнет 440 общей производительностью до 80 тыс. тонн в сутки.

В исследования и совершенствование систем пневматического транспортирования зерна и продуктов его переработки значительный вклад внесли Л.Е. Айзикович, В.Т. Артеменко, В.Р. Бурсиан, Н.П. Володин, А.М. Дзядзио, Э.Е. Дорфман, Ф.Г. Зуев, А.С. Кемлер, А.И. Кривошеин, Б.М. Максимчук, В.С. Пальцев, П.Н. Платонов, Г.М. Румянцев и др.

Работы, проведенные в ВЗИИП позволили совместить технологический процесс мойки и увлажнения зерна с гидротранспортом в зерноочистительных отделениях мельниц. Рациональность такого совмещения гидротранспорта с технологическим процессом подготовки зерна к помолу получило производственное подтверждение на мельнице Новая победа и внедряется на других предприятиях (например мельница в г. Новосибирске).

К одним из первых исследователей пневмотранспорта в нашей стране следует отнести М.Н. Калинушкина, О.М. Тодеса, В.А. Успенского и др.

Значительный вклад в исследованиях возможности при-

менения на мельницах аэрожелобов внесли А.Ф. Трунов, В.Ф. Журавлев и др.

Долгое время исследователи считали существенно различными количественные и качественные закономерности процесса пневматического и гидравлического транспортирования сыпучих материалов; эти различия становятся более значимы при переходе от низкой к высокой концентрации твердых частиц в потоке жидкости либо воздуха. Поэтому методы расчета основных параметров взвесенесущих потоков базировали на экспериментальных исследованиях влияния скоростей движения окружающей среды, диаметров материалопровода, производительности и предельной концентрации для конкретных сыпучих материалов в наперед заданном диапазоне указанных величин. Получаемые при этом методы расчета принципиально отличаются между собой. Например, метод расчета пневмотранспорта муки принципиально отличается от метода расчета аэрозольтранспорта её.

Различные методы расчета взвесенесущих потоков малых и высоких концентраций требуют значительной затраты времени и средств при внедрении пневматического и гидравлического транспорта еще не исследованных материалов, имеющих свои физические и аэродинамические свойства. Так, например, для определения величины необходимых расчетных параметров какого-либо транспортируемого материала следует предварительно провести экспериментальные исследования влияния на них скорости движения окружающей среды, диаметра материалопровода, нагрузки и предельной концентрации. Лишь после этого можно получить обобщенные (в заданном интервале) формулы, позволяющие определять необходимые расчетные параметры для проектирования

пневмо-гидротранспортных систем. Поэтому существующие методы расчета взвесенесущих потоков, предварительно требующие длительного экспериментального исследования, не способствуют быстрому внедрению этого вида транспорта в народное хозяйство, как это предусмотрено в решениях XXIV съезда КПСС. Только резкое сокращение предварительных экспериментальных исследований, необходимых для расчета пневмо-гидротранспорта позволит быстро внедрять его в народное хозяйство. Этого можно добиться только на основе описания общих закономерностей движения взвесенесущих потоков.

Получение обобщенных уравнений гидродинамики взвесенесущих потоков не только будет способствовать быстрому внедрению пневматического и гидравлического транспорта в народное хозяйство но и позволит решать ряд вопросов, связанных с технологическими процессами и их автоматизацией. К таким вопросам прежде всего следует отнести:

1. Снижение энергоемкости пневмотранспорта на зерноперерабатывающих и пищевых предприятиях.

2. Снижение скорости движения частиц с целью уменьшения их дробления, что имеет особое значение на гречесаво-дах и рисоаво-дах.

3. Управление технологическим процессом мойки и увлажнения зерна, при подготовке его к помолу.

4. Создание методов и конструкций пневмосепараторов при совмещении пневмотранспорта с сепарацией сыпучих материалов.

5. Рациональное использование воздушного потока для транспорта материала и аспирации технологического оборудования с целью улучшения технологического процесса и пре-

дупреждения взрывоопасных концентраций смеси на зерноперерабатывающих и других предприятиях.

6. Анализ процесса пневматического и гидравлического транспорта как объекта управления и разработка системы автоматического регулирования в широких пределах концентраций, производительностей и диаметров материалопровода для сыпучего материала различных физических свойств.

7. Правильно наметить пути дальнейших теоретических и экспериментальных исследований взвесенесущих потоков и сред, участвующих во многих технологических процессах как на зерноперерабатывающих предприятиях (сушка зерна), так и на предприятиях других производств.

8. В определенной мере вскрыть физическую сущность процесса взаимодействия оживающей среды с твердыми частицами.

В реферируемой работе ставится задача исследования общих закономерностей, имеющих место при взвесенесущих потоках различной концентрации и различных физических свойств оживающей среды.

Диссертация состоит из введения, семи глав, основных выводов и рекомендаций.

Во введении отмечены значение пневмотранспорта для зерноперерабатывающих предприятий и вклад научных организаций в исследование и совершенствование его.

В первой главе дан обзор работ, посвященных методам инженерного расчета пневматического и гидравлического транспорта различных концентраций и направлений движения.

Во второй главе изложены основные теоретические предположения, подтверждающие наличие общих закономерностей, свой-

ственных взвесенесущим потоком независимо от их концентрации.

В третьей главе приведены схемы экспериментальных установок, методика и объем проведенных исследований.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований, подтверждающим основные теоретические предположки.

В пятой главе рассмотрен порядок расчета гидравлических сопротивлений взвесенесущих потоков и частные их случаи - вертикальный мельничный пневмотранспорт зерна и продуктов его размола, а также аэрозольтранспорт муки.

В шестой главе приведены результаты исследований минимальной рабочей скорости оживающей среды для осуществления надежного транспорта материала в вертикальном и горизонтальном направлениях. В этой же главе кратко приведены результаты исследования вертикального пневмотранспорта в трубопроводах, имеющих кольцевое поперечное сечение. Они указывают на возможность снижения минимальной рабочей скорости и, в связи с этим, энергоемкости транспортирования материала.

В седьмой главе приведены результаты аэродинамических и технологических исследований пневмосепаратора ОТИ, созданного в результате изучения общих закономерностей, имеющих место при взвесенесущих потоках.

Из анализа работ, посвященных исследованию взвесенесущих потоков следует, что в настоящее время существует два предположения, на основании которых считают существенно различными количественные и качественные закономерности при переходе от низкой к высокой концентрации твердых частиц в потоке жидкости или газа.

Предположение первой группы исследователей, основанное на том, что механизм взаимодействия оживающей среды с твердыми частицами (во взвешивающих потоках) зависит от режима (турбулентности) потока, вполне обосновано. Это подтверждается тем, что на турбулентность оживающей среды влияет кинематическая структура потока, зависящая, в свою очередь, от концентрации, физических свойств и скорости движения жидкости (газа), плотности, размеров и формы твердых частиц и трубопровода.

Предположение второй группы, основанное на перераспределении энергии, т.е. на резком снижении рабочих скоростей оживающей среды при высоких концентрациях смеси, нельзя считать обоснованным. Необоснованность подтверждается тем, что снижение расходной рабочей скорости оживающей среды (по свободному сечению трубопровода) при транспорте с высокой концентрацией не означает снижения истинной скорости обтекания частиц.

Попытки некоторых исследователей (например, Н.А.Слезкин, А.Б.Смолдырев и др.) теоретически составить в общем виде уравнения движения неоднородной жидкости имеют большое научное значение. Однако полученные уравнения невозможно применить для решения инженерных задач без дополнительного теоретического или экспериментального исследования таких вопросов как:

- влияние крупности частиц, их концентрации и физической неоднородности на турбулентные характеристики и пульсации потока;

- относительные скорости движения частиц в стесненных условиях;

- законы распределения осредненных скоростей и концентраций в сечениях материалопровода;
- изменение кинематической структуры и смещение динамической оси потока;
- образование кавитационных полостей при изменении прямолинейности течения взвесенесущих потоков и ряд других вопросов, связанных с изменением режима движения взвесенесущих смесей.

Накопленный опыт научно-исследовательских работ позволяет в настоящее время подходить к гидродинамике взвесенесущих потоков с некоторых общих позиций, что дает возможность выяснить ряд общих закономерностей и на их основе ускорить внедрение пневмо-гидротранспорта, совмещая его с рядом технологических процессов во многих отраслях народного хозяйства.

С.С.Забродский один из первых обратил внимание на наличие общих закономерностей при пневмотранспорте различных концентраций, т.е. на возможность описания гидродинамики таких потоков едиными уравнениями. В последние 5-10 лет к такому выводу приходят и другие исследователи, например, М.А.Дементьев, В.Бекк, А.К.Миненко. Однако их исследования ограничиваются только предположениями о существовании общих явлений, имеющих место при расширении и движении двухкомпонентных сред и потоков (С.С.Забродский) или полученные уравнения не доведены до инженерного вида.

Из опубликованных исследований видно, что основное доказательство различия закономерностей явлений, происходящих в потоках с низкой и высокой концентрациями смеси - нераспределение энергии - не учитывает истинных скоростей

движения жидкости относительно твердых частиц. Снижение средней расходной рабочей скорости (по свободному сечению трубопровода), имеющее место при транспорте с высокой концентрацией не означает такого же снижения истинной скорости обтекания частиц, от которой, как показывает эксперимент, зависит гидродинамическая сила. Другие доказательства сторонников различия в закономерностях гидродинамики потоков различной концентрации, вытекающие из основного положения, также не являются бесспорными. Поэтому возможно и следует рассматривать гидродинамику взвесенесущих потоков с точки зрения общих положений, а не только явлений различающих их. К таким общим положениям, справедливым для всех взвесенесущих потоков следует отнести:

I. Изменение режима потока оживающей среды при наличии в ней твердых частиц можно учитывать изменением величины скорости витания, т.е. величиной, на которую непосредственно он влияет. Такое предположение основано на том, что силы, действующие на твердые частицы со стороны жидкости (газа) обусловлены истинной скоростью обтекания и режимом движения ее. Поэтому скорость стесненного витания частиц, измеренная по свободному сечению материалопровода характеризует силы воздействия на твердые частицы со стороны жидкости с учетом изменения режима ее движения и кинематической структуры потока. Вид расчетных зависимостей потерь удельной энергии оживающей среды, при этом остается неизменным. Характерным линейным размером потока оживающей среды для взвесенесущих смесей при определении критерия Рейнольдса следует принимать гидравлический радиус - отношение объема твердых частиц к смоченной поверхности. Размер твер-

дой частицы может характеризовать линейный размер потока ожимающей среды в случае падения твердого тела в неподвижной жидкой среде практически неограниченного поперечного сечения.

2. При одинаковых расходных скоростях ожимающей среды потери давления на ее перемещение различны при отсутствии и наличии в трубопроводе твердых частиц, так как при этом изменяется критерий Рейнольдса и, следовательно, изменяется коэффициент λ .

3. Ожимающая среда может передавать твердым частицам часть своего запаса энергии лишь в том случае, когда имеет место их относительное движение (скорость скольжения).

4. Необходимая для перемещения твердых частиц энергия не зависит от режима, кинематической структуры потока и физических свойств ожимающей среды. Ожимающая среда является лишь источником, из которого твердые частицы получают энергию, затрачиваемую ими при своем движении. Поэтому расчет полной удельной энергии, необходимой для перемещения твердых частиц следует вести по отношению к единице их объема, а потери полной удельной энергии ожимающей среды будут больше на величину потерь давления, затраченных ею на свое перемещение.

5. Расходная скорость (скорость по свободному сечению трубопровода) ожимающей среды, по которой ведут все расчеты взвесенесущих потоков не всегда соизмерима со скоростью обтекания частиц. Чем больше частиц находится в трубопроводе, тем меньше их скорость витания, определяемая по расходной скорости ожимающей среды.

6. Величина гидравлической силы, действующей на твердую частицу обусловлена истинной (а не расходной) скоростью

обтекания.

7. Эюра скоростей ожимающей среды приводит к неравномерной передаче энергии всем частицам, находящимся в данном сечении трубопровода. Между формами эюр скоростей ожимающей среды и твердых частиц, как показывают исследования, существует взаимосвязь, зависящая от концентрации смеси.

Для горизонтальных взвесенесущих потоков физическое понятие о скорости витания принципиально неприменимо. Однако практика показывает, что скорость витания в какой-то мере и однозначно характеризует поведение твердой частицы в горизонтальных взвесенесущих потоках. Поэтому в настоящее время скорость витания применяют не только при расчетах вертикальных взвесенесущих потоков, но и при горизонтальных.

Наши экспериментальные исследования показывают, что подъемная сила, действующая на твердую частицу, находящуюся в горизонтальном трубопроводе зависит от скорости обтекания жидкостью (газом). Скорость обтекания, рассчитанную по свободному сечению горизонтального трубопровода, при которой наступает равенство силы тяжести частицы и подъемной силы назовем взвешивающей скоростью (V_{Sr}). При скорости больше V_{Sr} подъемная сила становится больше силы тяжести частицы и она начинает подниматься. Опыт показывает, что при определенной скорости ожимающей среды $V_{So} > V_{Sr}$ частица поднимается до оси трубопровода и продолжает колебаться около нее при любой другой скорости $V > V_{So}$.

Если $\rho_n < \rho$, то поведение частицы при обтекании жидкостью такое же как при $\rho_n > \rho$. Отличие лишь в том, что с ростом V частица отрывается от верхней, а не от нижней стенки трубопровода и достигает оси при $V = V_{So}$.

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что между величинами U_s , U_{sr} и U_{so} существует однозначная взаимосвязь. Так как скорость U_{so} характеризует распределение твердых частиц по сечению горизонтального материалопровода, то она в определенной степени должна отвечать кинематической структуре горизонтального взвесенесущего потока. Поэтому величина U_s , которая однозначно связана с величинами U_{sr} и U_{so} , может характеризовать режим потока и его кинематическую структуру не только вертикальных, но и горизонтальных взвесенесущих потоков.

Поставленная в диссертации задача и указанные общие положения, справедливые для всех взвесенесущих потоков определили направление и порядок экспериментальных и теоретических исследований. Так исследованию гидродинамики взвесенесущих потоков предшествовало изучение таких вопросов, которые косвенно характеризуют структуру и турбулентность оживающей среды взвесенесущих потоков, а именно:

1. скорость витания частиц в свободных условиях, условиях стеснения стенками и количеством частиц, находящихся в трубопроводе;
2. изменение скорости витания при изменении физических свойств оживающей среды;
3. взвешивающая скорость частиц в горизонтальных трубопроводах при газообразной и капельной жидкостях, т.е. расходная скорость оживающей среды, при которой твердая частица отрывается от дна материалопровода;
4. плотность укладки зернистых частиц;
5. расширение взвешенного зернистого слоя в восходящем потоке оживающей среды, как газообразной, так и капельной;
6. скорость оживающей среды в начале псевдооживления;

7. гидравлическое сопротивление твердого компонента в псевдооживленном состоянии;

8. изменение формы эпюры скоростей оживающей среды в зависимости от количества частиц, находящихся в трубопроводе.

На основании указанных общих закономерностей, имеющих место при двухкомпонентных средах, и проведенных экспериментальных исследований в диссертации приведена рабочая гипотеза в виде диаграммы состояния сыпучей массы в вертикальном восходящем потоке.

Суть предлагаемой в диссертации диаграммы состояния сыпучей массы состоит в следующем. Так как гидродинамическая сила, действующая на твердую частицу зависит от скорости обтекания жидкой средой, то вследствие наличия эпюры скоростей не все частицы, находящиеся в каком-либо сечении материалопровода приобретают одинаковый запас энергии. Поэтому при достаточно высокой расходной скорости оживающей среды возможны случаи сползания некоторой части твердых частиц вдоль стен вертикального материалопровода, в то время как другие частицы будут перемещаться вверх. Это приводит к неравномерному распределению твердых частиц по сечению материалопровода, т.е. к неравномерной плотности взвесенесущего потока (среды) не только по высоте, но и по поперечному сечению.

Увеличенная локальная по сечению материалопровода плотность распределения частиц приводит к увеличению истинной скорости обтекания их (с одной стороны) и увеличению сопротивления проходу оживающей среды (с другой стороны). Так как закономерности изменения гидродинамической силы, действующей на частицы и сопротивление проходу оживающей

среды через сыпучую массу различны, то между формой эпюры оживающей среды и эпюрой распределения количества частиц по поперечному сечению материалопровода существует определенная взаимосвязь.

Исследования М.Э.Аэрова и Н.Н.Умника, а также наши экспериментальные исследования показывают, что с увеличением средней по сечению материалопровода плотности взвесенесущего потока (среды) форма эпюры оживающей среды изменяется несколько раз. Вначале степень вытянутости эпюры скоростей — отношение максимальной скорости по оси материалопровода к средней ее величине — уменьшается. При дальнейшем росте плотности степень вытянутости эпюры увеличивается и вновь уменьшается, а при плотности, близкой к плотности начальной укладки твердых частиц скорость оживающей среды у стен материалопровода становится даже больше, чем по его оси.

В результате наличия взаимосвязи между формой эпюры оживающей среды и эпюрой распределения количества твердых частиц по сечению материалопровода твердую сыпучую массу, в зависимости от расходной скорости оживающей среды, можно представить в виде нескольких фазовых состояний:

1. Неподвижное — при V меньше скорости стесненного витания, соответствующей $V_{ну}$.
2. Расширение слоя при неизменной форме эпюры скоростей оживающей среды. При этом, V должно быть больше скорости стесненного витания, соответствующей $V_{ну}$; увеличение V приводит к уменьшению β .
3. Расширение слоя при незначительном изменении формы эпюры скоростей оживающей среды. Закончивается это фазовое состояние сыпучего материала при форме эпюры оживающей сре-

ды, когда жидкость не в состоянии передать необходимую энергию всем частицам для преодоления их сил тяжести.

4. Фонтанирование и поршнесобразование, вызвано большей интенсивностью расширения слоя, находящегося на оси материалопровода, чем у стен. Причина этого — большая степень вытянутости эпюры скоростей оживающей среды. При этом сопротивление проходу оживающей среды в центральной части сечения материалопровода становится меньше и жидкость (газ), устремляясь в зону пониженной концентрации выталкивает частицы за пределы свободной поверхности слоя. Наблюдается выход оживающей среды из слоя в виде "пузырей". Рост скорости V приводит к увеличению так называемого борботажа по ширине и высоте слоя. За пределы свободной поверхности слоя выходит такое количество твердых частиц, что при падении они образуют пробку (поршень).

Дальнейшее увеличение расходной скорости оживающей среды приводит к увеличению интенсивности поршнесобразования и сыпучая масса покидает вертикальный материалопровод в виде пульсирующих "поршней".

Выход сыпучей массы из материалопровода в виде поршней уменьшает количество и снижает объемную концентрацию до такой степени, при которой скорость стесненного витания частиц практически равна скорости их свободного витания, а форма эпюры скоростей оживающей среды способствует передаче энергии всем твердым частицам, находящимся в поперечном сечении. Таким образом подготовлены условия к движению взвесенесущих потоков при так называемом транспорте с малыми концентрациями.

Диаграмму фазового состояния сыпучей массы можно рас-

✓ 122-19

Одесский технологический институт пищевой промышленности им. М.П.Драгоманова

смагивать как состояние взвесенесущих потоков при условии замены твердых частиц новыми порциями. Отличием фазового состояния сыпучей массы от состояния транспорта является лишь некоторое количественное изменение взаимосвязи между расходной скоростью оживающей среды, формой ее эпюры и локальным по поперечному сечению материалопровода распределением твердых частиц. Это изменение вызвано тем, что при движении твердых частиц их скорость переменна по высоте и поперечному сечению материалопровода, что изменяет локальные величины β в этих направлениях. Однако качественные зависимости между указанными величинами остаются неизменными. Поэтому если во время состояния расширения слоя при неизменной форме эпюры скоростей оживающей среды в нижнюю часть материалопровода, каким-либо способом, вводить новые порции твердых частиц, то можно осуществить транспорт расширением слоя сыпучей массы.

Ввод в материалопровод дополнительных порций твердых частиц при расходных скоростях оживающей среды, соответствующих расширению слоя при незначительном изменении формы эпюры скоростей приводит к так называемому транспорту сплошным потоком.

Подачей твердых частиц в материалопровод при расходных скоростях оживающей среды, соответствующих процессу поршнеобразования можно осуществить так называемый транспорт поршнями.

Транспорт, называемый в настоящее время транспортом при малых концентрациях можно осуществить подачей твердых частиц в материалопровод при величине β , обеспечивающей скорость стесненного витания практически равную скорости свободного витания.

Приведенная гипотеза проверена нами экспериментально. Фазовые состояния расширения, фонтанирование, поршнеобразования и др. очень четко наблюдаются при оживлении сыпучей массы капельной жидкостью (вода). При оживлении воздухом переход от одного состояния к другому наблюдается менее четко, но достаточно наглядно.

Переход от неподвижного состояния сыпучей массы к транспорту расширением, сплошным потоком, поршнеобразованием и с малой концентрацией (при последовательном увеличении расходной скорости воздуха) нами исследован на вспененных гранулах полистирола в материалопровode диаметром 78 мм и высоте 3,5 м. Путем торможения движущихся гранул вспененного полистирола (с помощью прикрытия шибера установленного в конце материалопровода) можно увеличивать зону расходных скоростей воздуха при которой осуществляется пневмотранспорт вспененных гранул полистирола сплошным потоком.

Из приведенной фазовой диаграммы можно сделать несколько выводов:

1. Устойчивое гидравлическое или пневматическое транспортирование сыпучих материалов можно осуществить лишь при определенных величинах β , при которых оживающая среда имеет форму эпюры скоростей, обеспечивающую передачу энергии всем твердым частицам, находящимся в поперечном сечении материалопровода.

2. Взвесенесущие потоки различной концентрации, как и состояние псевдооживления и расширения сыпучей массы, имеют общие закономерности, несмотря на значительные количественные изменения их характеристик.

3. Управляя величиной скорости движения твердых час-

тиц (V_M), например их торможением, можно осуществить транспорт сплошным потоком при значительных расходных скоростях оживающей среды или увеличенных диаметрах материалопровода, т.к. V_M определяет величину β .

4. Применяя форму поперечного сечения материалопровода, обеспечивающую более выравненную форму эпюры скоростей оживающей среды можно осуществлять взвесенесущие потоки при пониженных расходных скоростях жидкости (газа).

Проведенные в диссертации теоретические исследования, основанные на приведенных рабочей гипотезе и основных положениях, справедливых для всех взвесенесущих потоков, позволили получить вид расчетных уравнений для определения потерь удельной энергии оживающей среды с указанием коэффициентов, которые необходимо определить экспериментально. При выводе расчетных уравнений принят метод разделения потерь, отличающийся от известного следующим:

1. Затрата энергии на перемещение твердого компонента определена как работа, отнесенная к единице объема перемещаемого материала и поэтому полученные исходные уравнения справедливы для любых источников, от которых частицы получают энергию для своего движения.

2. Расчет энергии, необходимой для разгона твердых частиц учитывает энергию их вращения.

3. Потери давления на собственное перемещение оживающей среды разделены на две составляющих: потери давления при отсутствии в материалопроводе твердых частиц (H_2) и дополнительные потери давления (ΔH), вызванные изменением режима потока вследствие наличия в материалопроводе твердых частиц.

В случае взвесенесущих потоков, когда твердые частицы получают энергию от оживающей среды, находящейся в трубопроводе одновременно с ними, - эти уравнения приобретают следующий вид:

$$H_p = \frac{V_M}{V_{жк}} \frac{\rho_M}{2} (V_M + a); \quad (1)$$

$$H_g = \frac{V_M}{V_{жк}} g (\rho_M - \rho) l; \quad (2)$$

$$H_T = \frac{V_M}{V_{жк}} \frac{\rho}{D} l \frac{\rho_M \bar{V}_M^2}{2} \quad (3)$$

для вертикального транспорта;

$$H_T = \frac{V_M}{V_{жк}} \frac{\rho_T}{D^2} l \frac{\rho_M \bar{V}_M^2}{2} g \left(\frac{\rho_M}{\rho} - 1 \right) \quad (4)$$

для горизонтального транспорта;

$$H_{жк} = \sum \zeta_M \frac{V_M}{V_{жк}} \frac{\rho_M \bar{V}_M^2}{2}. \quad (5)$$

Вследствие того, что при взвесенесущих потоках оживающая среда может передавать энергию твердым частицам только при своем движении, то она затрачивает дополнительную энергию на собственное перемещение $H_{жк}$. Так как при одинаковой расходной скорости оживающей среды, наличие в трубопроводе твердых частиц изменяет потери энергии её на собственное перемещение в сравнении с потерями при отсутствии частиц, то

$$H_{жк} = H_2 + \Delta H, \quad (6)$$

где ΔH - дополнительная величина потерь давления на перемещение только оживающей среды, вызванная наличием в трубопроводе твердых частиц.

При вертикальном пневмотранспорте

$$\Delta H = \frac{V_M}{V_{жк}} \frac{\zeta}{D} l \frac{\rho (V - \bar{v}_{жк})^2}{2}, \quad (7)$$

а для вертикального участка равномерного движения твердых частиц

$$\Delta H = \frac{V_{nc}}{V_{sc}} \frac{\xi}{2} l \frac{\rho (v_s')^2}{2} \quad (8)$$

В случае горизонтального движения взвесенесущего потока коэффициент ξ изменится на ξ_r .

Суммарные потери оживающей среды при взвесенесущих потоках будут равны

$$H_{сум} = H_p + H_g + H_r + H_{мс} + H_k + \Delta H. \quad (9)$$

Коэффициенты ξ , ξ_r , f и f_r определяются экспериментально.

Потери H_r вызваны соударением частиц, ударами их о стенки трубопровода, а также деформацией и дроблением.

Коэффициент торможения f зависит от фрикционных свойств частиц и трубопровода, а также от свойств оживающей среды и скорости движения частиц, т.е. от параметров, влияющих на силу трения. Физический смысл коэффициента торможения можно представить, как затрату полной энергии оживающей среды (в джоулях), находящейся в объеме трубы длиной равной диаметру, выраженной в долях кинетической энергии частиц, находящихся в том же объеме. Следовательно, физический смысл f отличается от физического смысла λ_m , который представляет затрату полной удельной энергии оживающей среды (Па) на длине трубопровода равной D , выраженной в долях удельной кинетической энергии оживающей среды при $M = 1$. Кроме того, принципиальное отличие λ_m от f заключается в том, что λ_m учитывает не только потери на торможение, но и потери ΔH . Поэтому в тех случаях, когда величина f постоянна, λ_m переменна и не может полностью характеризовать потери давления только на преодоление торможения частиц и их дробление.

Проведенный анализ полученных уравнений потерь давления показывает:

1. Применение их ограничено движением частиц без замятия трубопровода и плотностью взвесенесущего потока β меньше плотности развитого псевдооживления.

2. Уравнение Гастерштадта для расчета пневмотранспорта является частным случаем полученных нами общих уравнений, из которых следует, что коэффициент Гастерштадта зависит от многих переменных

$$K = \frac{\rho v'}{\rho_m (v_{nc} v_{sc} - \rho v'^2)} \left(\frac{f_r}{v'^2} g \frac{\rho_m v_{nc}^2}{2} + \frac{\xi_r}{2} \frac{\rho (v_s')^2}{2} \right).$$

3. Наиболее общей характеристикой взвесенесущих потоков является величина $\beta' = \frac{V_{nc}}{V_{sc}}$, которая может быть выражена через плотность потока $\beta = \frac{V_{nc}}{V_r}$ и в большей степени отвечает физическому смыслу, чем M' и другие параметры

$$\beta' = \frac{\beta}{1 - \beta}.$$

При $\beta < 0,10$ различие между β и β' не превышает 10%, что для инженерных расчетов вполне допустимо и поэтому вместо $\beta' = \frac{G}{\omega \rho_m v_{nc} - G}$ можно пользоваться более простой зависимостью

$$\beta = \frac{G}{\omega \rho_m v_{nc}} \quad (10)$$

Параметры β и β' , полученные в реферируемой работе теоретически, можно встретить, в том или ином виде, в практике расчета гидравлического и пневматического транспорта. Например, понятие о консистенции, применяемое при расчетах гидротранспорта

$$\frac{\rho_{ср} - \rho}{\rho_m - \rho_{ср}} = \beta', \quad \text{а} \quad \frac{\rho_{ср} - \rho}{\rho_m - \rho} = \beta.$$

Предложенный Кикава основной расчетный параметр для горизонтального пневмотранспорта $M = \frac{\rho}{\rho_m} \frac{v'}{v_{nc}} M' = \beta$ и по его мнению лучше характеризует явления, чем весовая (M') и объемная ($v' \frac{v'}{v_{nc}}$) концентрации.

Предложенный Н.А.Степановым параметр ρ' , представляющий отношение веса материала к весу газа, находящегося в том же объеме трубы представляет величину $\frac{\rho_{\text{м}}}{\rho} \rho'$.

Фоллгейм также пользуется понятием плотности потока β . Однако эту величину он не считает основной. То же отмечает Г.Вельшоф.

Встречаемые расчетные параметры $\frac{G'}{D}$, $\frac{G'}{\omega L}$, $\frac{Q'}{\omega L}$, $\frac{G'}{\omega}$ и т.д. в той или иной мере связаны с ρ или ρ' .

Из уравнения (I + 8) с учетом уравнения (IO) видно, что в общем случае расчет взвесенесущих потоков нельзя вести сразу по всей длине трубопровода. Необходимо общую длину его предварительно разделить на участки, где с достаточной точностью можно принять скорость движения частиц постоянной. Определив $H_{\text{сч}}$ для каждого участка в отдельности можно получить общую величину потерь как сумму на каждом участке. Учитывая экспериментальное определение коэффициентов f , f_r , ζ , ζ_r и ζ_n , а также применение на практике длин трубопроводов, где разгон частиц практически закончен, время, затрачиваемое на расчет $H_{\text{сч}}$ без существенного снижения точности его, можно значительно сократить. Для этого расчет ведут по скорости частиц на участке равномерного движения, а в уравнение (9) вводят дополнительные слагаемые на частично неучтенные, при таком методе расчета, величины H_T , ΔH и H_D за счет изменения \mathcal{U}_r на разгонном участке. Тогда уравнение (9) принимает вид:

$$H_{\text{сч}} = H_p + H_d + H_T + H_{\text{сч}} + H_L + \Delta H + \Delta(H_T + \Delta H + H_D).$$

Из теоретических и экспериментальных исследований А.Е.Смолдырева, А.П.Юфина и полученных нами уравнений (I + 8) следует, что потери удельной энергии окружающей среды, в частности при вертикальном гидротранспорте твердых частиц, всегда

больше, чем при движении только чистой воды. Однако, по экспериментальным данным М.В.Мальцева (Тр.МИСИ, вып.45, М., 1963) потери напора на трение смеси воды и песка при вертикальном гидротранспорте остаются такими же, что и для чистой воды, несмотря на то, что наличие песка в гидросмеси привело к резкому снижению шероховатости стальной трубы, в результате чего через 10 часов работы гидротранспортной установки потери напора при движении чистой воды уменьшились на 25 + 30%. Поэтому возникла необходимость в рассмотрении вопроса о требованиях, предъявляемых к схемам экспериментальных установок, предназначенных для исследования вертикального гидротранспорта и фазовой диаграммы сыпучего материала при оживлении его капельной жидкостью.

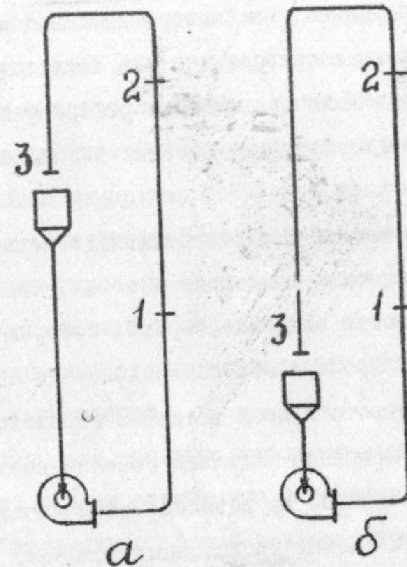


Рис. I.

В реферируемой работе, показано теоретически и проверено экспериментально, что разность пьезометров, установленных между сечениями 1-2 только тогда покажет истинные потери полной удельной энергии жидкости на этом участке, если сечение 3, где давление равно атмосферному, находится выше или на уровне сечения 2 (рис.1). Если исследования проводить на экспериментальной установке, изображенной на схеме а рис.1, где сечение 3 находится ниже сечения 2, то разность пьезометров, включенных между сечениями 1-1, не покажет всех потерь, имеющих место между этими сечениями. Измеренная величина потерь будет тем меньше, чем ниже сечение 3 находится относительно сечения 2.

Если сечение 3 опустить ниже сечения 1, как это изображено на схеме б рис.1, то разность давлений в сечениях 1 и 2 покажет потери только по длине, без потерь давления на подъем.

Учитывая рассмотренные требования, все исследования при капельной оживающей среде были проведены в реферируемой работе на экспериментальных установках, где сечение 3 находилось выше сечения 2.

Скорость движения частиц в горизонтальных трубопроводах измеряли радиоактивным методом и методом отсечек. Метод отсечек был реализован с помощью задвижек, привод которых осуществляли пороховыми газами. Необходимое быстрое действие (10-14 мс) достигалось подбором соответствующей величины порохового заряда. Одновременность срабатывания задвижек обеспечивалась запальным устройством, основанным на возникновении электродуговой искры при перегорании тонких проводочных вставок.

Исследования показали, что определение v_{min} по скорости "завала", как это принято во многих работах, приводит к большому разбросу экспериментальных точек и затрудняет обработку при отыскании обобщающей математической зависимости. Поэтому

минимальную рабочую скорость оживающей среды при вертикальном транспорте определяли по устойчивым показаниям микроманометра и эпюры скоростей оживающей среды в зоне "завала". Применяя приемники типа ОТИ предварительно снижали скорость воздуха до появления "подсора", а затем увеличивая ее достигали устойчивой работы, определяемой по стабильному показанию микроманометра и возможности измерения эпюры скоростей. Если повторное измерение эпюры давало практически одинаковые результаты, такую скорость воздуха принимали допустимой для устойчивой работы. Принятая методика исследования v_{min} давала достаточно удовлетворительную сходимость в результатах и относительно небольшой разброс экспериментальных точек.

При экспериментальном определении взаимосвязи между скоростью витания и взвешивающей скоростью частиц в горизонтальных трубопроводах испытуемый шар закрепляли тонкой капроновой нитью, вес которой был пренебрежительно мал с весом частицы. Таким образом испытуемый шар не мог двигаться вдоль трубопровода имея возможность перемещения в вертикальном направлении.

Методика измерения остальных величин практически не отличалась от общепринятой при исследовании взвесенесущих потоков.

Краткий перечень схем экспериментальных установок и объем исследований указаны в табл.1 и 2.

Проведенные экспериментальные исследования разделены на несколько направлений.

1. Изучение основных аэродинамических параметров частиц, находящихся в псевдооживленном состоянии.
2. Определение потерь давления при перемещении сыпучего материала.
3. Определение формы эпюр скоростей оживающей среды в зависимости от плотности двухкомпонентных сред.

4. Влияние формы поперечного сечения трубопровода на основные аэродинамические параметры двухкомпонентных потоков, включая эпюру скоростей оживающей среды.

5. Влияние схемы экспериментальной установки на правильность показаний дифманометра, включенного в вертикальный участок трубопровода, по которому движется капельная жидкость.

6. пневмосепарация совместно с пневмотранспортом на зерноперерабатывающих предприятиях.

Обработка экспериментальных данных проведена в безразмерных координатах, полученных на основе теории подобия и размерностей. Полученные экспериментальные уравнения гидродинамики взвесенесущих потоков, по возможности, приводили к виду, удобному для инженерных расчетов.

Исследования показывают, что скорость стесненного витания зернистых частиц с $d \geq 1,5$ мм в зависимости от скорости свободного витания, в указанном в табл. 2 диапазоне исследований, можно рассчитывать по уравнению

$$v_s' = v_s \left(\frac{1 - \beta}{1 + \frac{1}{2} \frac{\beta}{\alpha}} \right)^{\frac{m}{2-m}} \quad (II)$$

где

$$m = 0,5 \left[\left(\frac{1}{1 - \frac{d}{2}} \right)^{0,5} \left(1 - \frac{d}{2} \right)^{0,5} + \frac{\rho}{\rho_r} \right]$$

В тех случаях, когда скорость свободного витания частицы неизвестна, то v_s' или v_s можно рассчитывать по уравнениям

$$\text{при } Re < 70 \cdot 10^3, \quad Re = 0,33 \left(A_i \frac{d}{2} \right)^{0,58} \quad (I2)$$

$$\text{при } 70 \cdot 10^3 < Re < 160 \cdot 10^3$$

$$Re = 45 \cdot 10^3 + 0,14 \cdot 10^{-4} A_i \frac{d}{2} \quad (I2a)$$

$$\text{где } Re = \frac{v_s' R_r}{\nu}$$

Таблица I.

Установки, на которых были проведены экспериментальные исследования

Назначение экспериментальной установки	Количество установок	Примечание
I. Исследование транспорта		
а вертикальный (в круглых и кольцевых материалопроводах);	3	$l = 5,5-13,2$ м
б горизонтальный.	2	$l = 10 - 25$ м
2. Исследование скорости витания и расширения слоя.	4	
3. Исследование эпюры скоростей оживающей среды в зависимости от β ;	3	В круглых и кольцевых каналах
4. Исследование плотности укладки зернистых материалов.	2	- " -
5. Исследование влияния сифона при вертикальном движении капельной жидкости на показания дифманометра.	2	Вертикальная и горизонтальная установки
6. Исследование скорости движения частиц в горизонтальных трубопроводах.	1	
7. Исследование взаимосвязи между скоростью витания и взвешивающей скоростью в горизонтальных трубопроводах (v_{sr}).	2	Для воды и воздуха
8. Исследование пневмосепаратора ОГИ.	2	

Примечание Различие в диаметрах материалопроводов не входит в графу "количество установок".

Таблица 2.

Объем проведенных экспериментальных исследований

Искомый параметр	Наименование исследуемых материалов и диапазон исследований	Количество опытов
$H_{ср}$	Зерно пшеницы, продукты размола, полиэтилен, полистирол, полистирол, опилки фосфат, пластмасса $\alpha = 0,2-15$ мм; $\beta = 75-150$ мм $\rho_n = 995-3400$ кг/м ³ ; $\beta = 0,001-0,035$.	1800
v_s и H_g в круглых трубах	Пшеница, продукты размола, пшено, гречиха, соя, кукуруза, свиная дробь, пластмасса, резина; форма-шар, куб, цилиндр, призма; $d = 0,2-37$ мм $\beta = 27-100$ мм, $\rho_n = 900-11800$ кг/м ³ , $\beta \leq 0,085$.	2500 и 850
v_s в кольцевых каналах	Пшеница, просо, полиэтилен, силикагель, пластмасса, сталь, свинец, $\alpha = 1,75-10$ мм, $\beta_n = \frac{\beta}{2} = 14,5-45$; $\frac{\beta}{2} = 0,01-0,155$; $\beta \leq 0,55$.	650
энергия скоростей в горизонтальных и вертикальных трубах	Пшеница, продукты размола, полиэтилен, пластмасса, силикагель, опилки, $\alpha = 0,2-10$ мм; $\beta = 75-250$ мм; $\frac{\beta}{2} = 0,10-0,80$; $\rho_n = 840-2650$ кг/м ³ .	600
плотность укладки	Зерна пшеницы, кукурузы, овса; полиэтилен, силикагель $\alpha = 2 = 10$ мм; $\beta = 14 = 450$ мм, $\frac{\beta}{2} = \frac{\beta}{2} = 5 = 50$ мм.	220
v_n	Зерна пшеницы, соя, шары; $\alpha = 3,6-10$ мм; $\beta = 75-200$ мм, $v = 18 - 30$ м/с; $v_s = 10-21$ м/с; $\rho_n \leq 6,5$.	450
E для пневмосепаратора ОТИ.	Пшеница, пшено; засоренность 0,5-2% при $\rho_n = 60-205$ кг/м ³ , $G \leq 2,8$ кг/с.	200
Требования к экспериментальным установкам вертикального гидротранспорта.	Вода; $\beta = 15$ мм $v = 0,6 - 3$ м/с; количество исследованных схем -- по 10 в вертикальной и горизонтальной плоскостях.	320

Для пневмотранспорта продуктов, применяемых на зерноперерабатывающих и пищевых предприятиях показатель степени в уравнении (II) принимает значение $\frac{m}{2-m} = 0,33$, а уравнения (I2) и (I2a) можно привести к виду

$$v_s' = 1,55 \left[g d \frac{1-\beta}{1+\frac{3}{2}\frac{\beta}{d}} \frac{\rho_n}{\rho} K_{\rho} \right]^{0,5} \quad (I3)$$

Значения K_{ρ} приведены в табл.3

Таблица 3.

Наименование продукта	Пшеница	Гречиха	Ячмень	Овес	Просо	Соя	Рожь	Горох
K_{ρ}	1,56	2,10	1,50	2,00	1,05	1,05	1,70	1,00

Исследования показали, что скорость витания твердых частиц изменяется с изменением физических свойств окружающей среды по следующей зависимости: при $\rho_n > 1000$ кг/м³

$$v_{s \text{ согн}} = \frac{v_{s \text{ согн}}}{\left(\frac{0,056 \rho_n - 1}{0,001 \rho_n - 1} \right)^n}; \quad (I4)$$

при $\rho_n < 1000$ кг/м³

$$v_{s \text{ согн}} = \frac{v_{s \text{ согн}}}{\left(\frac{0,056 \rho_n - 1}{1 - 0,001 \rho_n} \right)^n}. \quad (I5)$$

При $A_k = 3 \cdot 10^4 + 7 \cdot 10^7$ $n = 0,82$,

при $A_k = 2 \cdot 10^8 + 4 \cdot 10^{10}$ $n = 0,72$,

при $2 \cdot 10^8 > A_k > 7 \cdot 10^7$ величина n изменяется от 0,82 до 0,72 по уравнению прямой линии; при этом критерий Архимеда необходимо вычислять по ρ и d для воздуха.

Для мелкодисперсных частиц скорость витания можно считать по уравнениям:

$$\text{при } Re \frac{\rho}{\rho_n - \rho} > 0,8$$

$$V_s = 0,17 g R_r \left(\frac{\rho_{cr} - \rho}{\rho} \frac{d}{\lambda} \frac{1}{\delta g} \right)^{0,5}; \quad (16)$$

при $Re \frac{\rho}{\rho_{cr} - \rho} < 0,8$, что при оживлении газом соответствует частицам $d < 0,08$ мм,

$$V_s = (1,05 - 11,5 \cdot 10^3 d) g R_r \left(\frac{\rho_{cr} - \rho}{\rho} \frac{d}{\lambda} \frac{1}{\delta g} \right)^{0,5}. \quad (17)$$

Уравнения для расчета скорости витания справедливы при $d < \lambda$. При $d = \lambda$ понятие о скорости витания теряет смысл, так же как теряют смысл уравнения для его расчета.

Проведенные исследования показали, что между скоростью витания и взвешивающей скоростью воздуха, при которой частица отрывается от стенки горизонтального трубопровода (V_{sr}) или достигает его оси (V_{so}) имеется однозначная взаимосвязь:

$$V_{sr} = 1,45 V_s, \quad (18)$$

$$V_{so} = 1,85 V_s. \quad (19)$$

При скорости оживающей среды больше $1,85 V_s$ частица, лишенная возможности движения вдоль трубопровода, не может перемещаться в вертикальном направлении больше радиуса трубы.

Уравнения (18) и (19) в равной степени справедливы для газообразной и капельной жидкости, независимо от величины ρ_{cr} . При $\rho_{cr} < \rho$ величина V_{sr} будет характеризовать момент отрыва частицы не от дна трубопровода, а от его потолка.

Из уравнений (11-17) следует, что скорость витания зависит от условий стеснения частиц стенками трубопровода. Поэтому уменьшение скорости витания частиц можно достигнуть, например, применением трубопроводов кольцевого поперечного сечения. В этом случае скорость витания можно рассчитывать по уравнениям:

при $4 \cdot 10^3 < Re < 40 \cdot 10^3$

$$Re = 0,115 \left(Re \frac{\lambda d}{\lambda_H - \lambda_s} \right)^{0,6}; \quad (20)$$

при $40 \cdot 10^3 < Re < 80 \cdot 10^3$

$$Re = 23 \cdot 10^3 + 10^{-5} Re \frac{\lambda d}{\lambda_H - \lambda_s}. \quad (21)$$

Уравнения (20) и (21) не могут превратиться в уравнения (12) и (12а) при $\lambda_s = 0$, так как в этом случае расстояние между стенками внезапно увеличивается в два раза, а форма эпюры скоростей оживающей среды приобретает совершенно иной вид. Поэтому уравнения (20) и (21) не могут быть общими для каналов круглого и кольцевого поперечных сечений.

Исследование плотности укладки зернистых материалов позволило получить уравнения для ее расчета. В пределах отношения размера частицы к размеру расстояния между стенками канала до 0,55 начальную плотность укладки можно определить по формулам

$$\beta_{ny} = 0,65 - 0,40 \frac{d}{\lambda};$$

$$\beta_{ny} = 0,65 - 0,27 \frac{\lambda d}{\lambda_H - \lambda_s}.$$

Из уравнения (11), учитывая, что при расширении слоя зернистого материала $\ell_{ny} \beta_{ny} = \ell \beta$ можно получить уравнение для расчета высоты расширенного слоя (ℓ) в зависимости от скорости свободного витания частиц, скорости фильтрации и высоты слоя при начальной его укладке (ℓ_{ny})

$$\ell = \ell_{ny} \frac{\beta_{ny}}{1 - \left(\frac{V}{V_s} \right)^{\frac{2-m}{m}}} \left[1 + \frac{3}{\lambda} \frac{\lambda}{d} \left(\frac{V}{V_s} \right)^{\frac{2-m}{m}} \right]$$

и скорости оживающей среды в начале псевдооживления зернистых частиц

$$V_H = V_s \left(\frac{0,42 + 0,49 \frac{d}{\lambda}}{0,27 + 0,87 \frac{d}{\lambda}} \right)^{\frac{m}{2}}$$

Экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений твердой фазы подтвердили уравнение (8) и позволили определить коэффициент ζ , экспериментально полученные значения которого приведены на рис. 2.

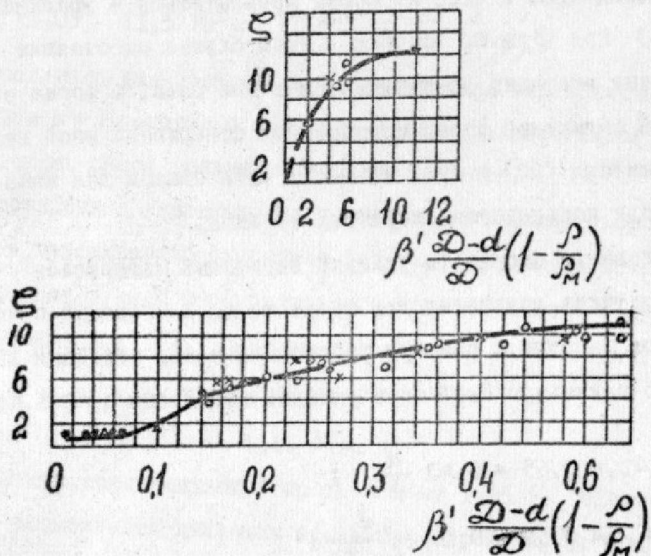


Рис. 2.

- -- пластмассовые шары $d = 10$ мм; $D = 50-150$ мм;
- -- дробь свинцовая $d = 2-5$ мм, $D = 50$ мм; × -- пшено $d = 2$ мм, $D = 150$ мм; Δ -- мулит $d = 9$ мм, $D = 50$ мм; ▽ -- шар $d = 35$ мм, $D = 50$ мм.

Для случая псевдооживления величину ΔH можно рассчитывать по уравнению

$$\Delta H = \frac{\zeta}{D} \frac{D-d}{D} \frac{\rho}{\rho_m} \ell_{\text{нп}} \beta_{\text{нп}} \frac{1 + \frac{3}{2} \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{v}{v_s}\right)^{\frac{2-2\sigma}{\sigma}}}{\left(\frac{v}{v_s}\right)^{\frac{2-2\sigma}{\sigma}} \left(1 + \frac{3}{2} \frac{\rho}{\rho_m}\right)} v^2$$

которое в сумме с H_a и H_g хорошо описывает экспериментальные данные известной кривой псевдооживления.

Для расчета v_M при вертикальном транспорте получено уравнение

$$v_M = A (v - v_s') \left[\frac{g \ell}{v v_s'} \left(\frac{d}{D}\right)' \right]^K; \quad (21)$$

$$A = 1,90; \quad K = 0,200 \quad \text{при} \quad \frac{g \ell}{v v_s'} \left(\frac{d}{D}\right)' < 0,01$$

$$A = 2,02; \quad K = 0,225 \quad \text{при} \quad \frac{g \ell}{v v_s'} \left(\frac{d}{D}\right)' > 0,01$$

На участке равномерного движения $v_M \approx v - v_s'$.

Для случая аэрозольтранспорта муки указанное уравнение, после замены в нем величин g , d и v_s' на их значения, принимает более удобный для инженерных расчетов вид:

$$v_M = 0,0028 \frac{\ell^{0,2} G^{0,6}}{D^{1,9}} v^{0,9}$$

Воспользовавшись уравнением (21) только для определения параметров, от которых зависит v_M , можно с помощью теории размерности и экспериментальных исследований получить более удобную для расчетов формулу в случае газообразной окружающей среды.

$$v_M = \frac{0,15}{(2g)^{0,135}} v_s'^{-0,3} \left(\frac{G}{\rho_m} \frac{v_M - v_s'}{D} \right)^{0,1} (g \ell)^{0,25} v_M, \quad (21a)$$

где v_M - скорость воздуха в начале вертикального материалопровода.

Из уравнения (21a) следует, что при ℓ больше определенной величины, v_M будет больше v_s' . Однако это не означает, что v_M будет больше истинной скорости воздуха в данном сечении материалопровода, так как с ростом ℓ увеличивается $H_{\text{см}}$, уменьшается ρ и растет v . Расчет показывает, что при $\ell = 1000$ м отношение v_M/v составляет 0,68.

Уравнение (21а) для случая пневмотранспорта зерна и продуктов его переработки можно привести к более простой инженерной формуле, заменив ρ_{cr} и g их значениями

$$V_M = 0,44 \frac{[G(V_M - V_S) d]^{0,1}}{(V_S \rho)^{0,3}} \rho^{0,25} V_M \quad (21б)$$

Для горизонтального транспорта зернистых частиц расчет следует вести, как показано в работе, по уравнению

$$V_M = B \left\{ V - \left[0,34 + \left(1 - 4,5 \frac{d}{\rho K_p} \right) e^{-\frac{2g l}{V^2}} \right] V_{Sr} \right\} \quad (22)$$

где

$$B = 1 - \frac{2,5 \cdot 10^6}{(\rho_M - \rho)^{3,75}} M^{1,5} \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{V_{Sr}}{V} \right)^6$$

На участке равномерного движения одиночной частицы $V_M = V - 0,34 V_{Sr}$.

В исследованиях показано, что при вертикальном и горизонтальном движении взвесенесущих потоков скорость твердых частиц никогда не достигает постоянного значения. Частицы на всем пути своего перемещения движутся с ускорением. Однако при расчетах, в зависимости от конкретных условий, изменением скорости материала на определенную величину можно пренебречь и считать V_M постоянной. В практике взвесенесущих потоков принято считать равномерное движение при $\frac{V_M}{V_{M \max}} = \alpha = 0,85 \div 0,95$.

Поэтому длину разгонного участка можно рассчитать по уравнениям:

для вертикального транспорта

$$l_p = 0,04 \alpha^5 \frac{V V_{Sr}}{g} \left(\frac{\rho}{\alpha} \right)^{1,1} \quad (23)$$

для горизонтального транспорта

$$l_p = \frac{V^2}{8g} \ln \frac{(1 - 4,5 \frac{d}{\rho K_p}) V_{Sr}}{(1 - \alpha)(V - 0,34 V_{Sr})} \quad (24)$$

Принятая в реферируемой работе методика экспериментального определения коэффициента торможения, в основном, такая же, как при определении λ_{cr} , K и λ_{cr} в других исследованиях взвесенесущих потоков. Отличие заключалось лишь в том, что H_{cr} на участке равномерного движения раскладывали на большее число слагаемых, так как величина H_7 в уравнениях (3) и (4) не учитывает потерь ΔH .

На рис.3 приведены результаты экспериментального определения коэффициента торможения для вертикального пневмотранспорта при различных концентрациях.

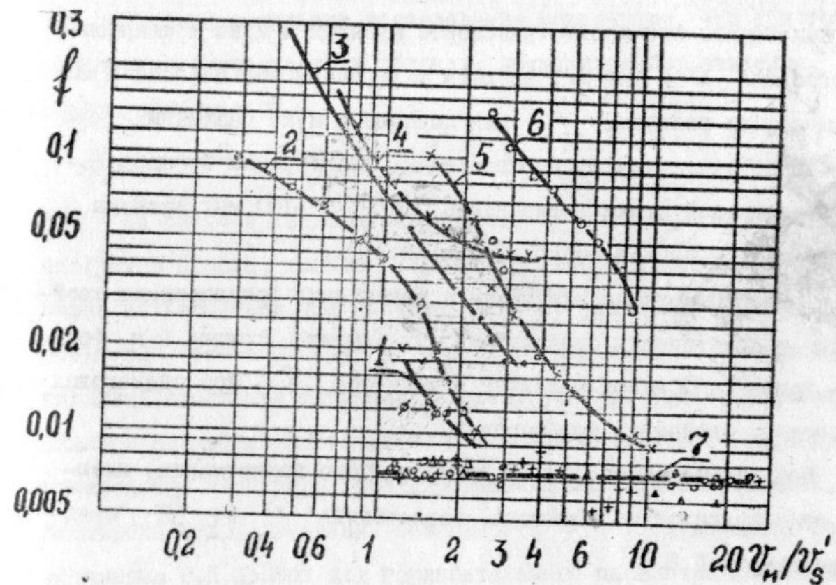


Рис.3.

Эти результаты показывают, что для цельнотянутых стальных труб (прямая 7) величина f для зерна и продуктов его размолла остается постоянной в широком диапазоне $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$, охватывающем зону пневмотранспорта и аэрозольтранспорта муки.

Независимость f в стальных бесшовных трубах для пшеницы и муки, имеющих некоторое различие фрикционных свойств, указывает на влияние пристенного потока, через который частица должна пройти, прежде чем достигнуть стенки трубопровода. На мелкую частицу (мука) влияние пристенного потока больше, чем на крупную (пшеница).

В подтверждение такого предположения приведены кривые 2 и 6, полученные при пневмотранспорте пшеницы и муки в сварном трубопроводе $\varnothing = 104$ мм, имеющем внутренний шов высотой 3 мм. В этом случае величины f для пшеницы и муки различны.

То же относится к трубопроводам, выполненным из кровельной оцинкованной стали в диапазоне $\varnothing = 75-100$ мм; пшеница (кривая 1) - мука и отруби (кривая 5).

Транспортируемые материалы с различными фрикционными свойствами и практически одинаковыми d (мука - кривая 6 и фосфат - кривая 4) имеют различие в величине f при одинаковых фрикционных свойствах трубопровода.

При пневмотранспорте гранулированного полиэтилена, имеющего свои фрикционные свойства, зависимость f от $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$ представлена кривой 3.

Обработка экспериментальных данных А.К.Миненко для вертикального пневмотранспорта высокой концентрации апатита, глинозема и цемента в стальных бесшовных трубах показывает единую зависимость f от $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$. Но величина f для этих материалов значительно больше, чем для муки и при малых значениях $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$ из-

меняется аналогично кривой 1. Только при $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'} > 3$ величина f приобретает постоянное значение.

Результаты обработки экспериментальных данных вертикального пневмотранспорта катализатора сплошным потоком, полученных в исследованиях И.М.Разумова, подтверждают зависимость f от $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$, аналогичную приведенным на рис.3. Естественно, что величина f для катализатора отличается от f для зерна пшеницы.

Обработка результатов экспериментальных данных А.П.Юфина при вертикальном гидротранспорте песка также показывает однозначную зависимость f от $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$, аналогичную приведенным на рис.3. Это подтверждает применимость уравнения (3) для вертикального гидротранспорта.

Экспериментальные исследования показывают, что при горизонтальных взвесенесущих потоках, движущихся без заиливания, в первом приближении

$$\zeta_r = 4 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p_{cr}}{p} - 1 \right) \left(\frac{\varnothing - d}{\varnothing} \right)^3 \frac{v_{cr}}{v_{cr}'} \quad (25)$$

На рис.4 приведена зависимость f_r от $\frac{v_{cr}}{v_{cr}'}$ для зерна и продуктов помола, включая аэрозольтранспорт муки. Этими данными можно пользоваться при расчете H_r по уравнению (4) для цельнотянутых бесшовных труб и труб, изготовленных из листовой оцинкованной стали при движении взвесенесущих смесей без заиливания. Аналогичные зависимости имеют место при пневмотранспорте других материалов, например, гранулированного полиэтилена, опилок, полистирола и др. Указанная зависимость f_r подтверждена исследованиями В.П.Кощобы для горизонтального пневмотранспорта зерна в трубопроводах некруглого поперечного сечения.

Поскольку исследуется гидродинамика горизонтальных взвесенесущих потоков, движущихся без заиливания, то скорость движения материала на участке равномерного движения в расчетных

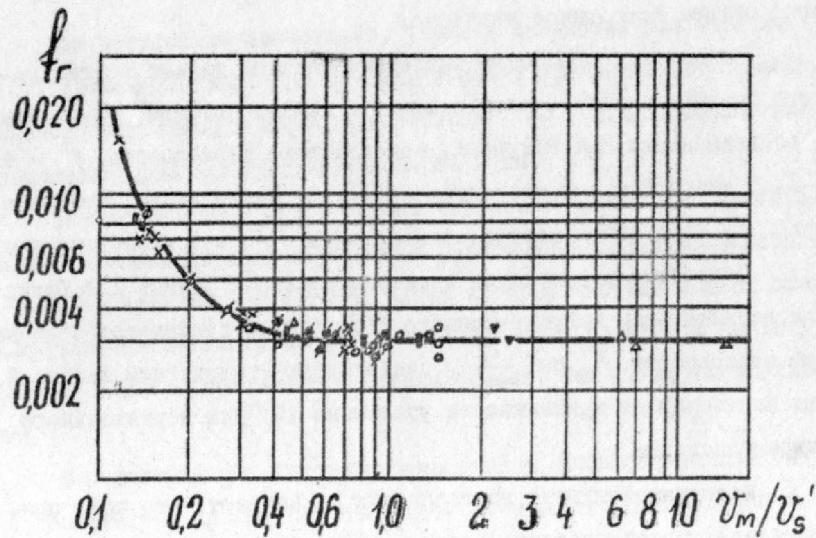


Рис. 4.

▽ - мука (наши исследования); ✕ - пшеница (по Гастерштадту); * - пшеница (наши исследования); ▲ - аэрозольтранспорт муки (по В.С.Пальцеву); ○ - пшеница (по Зеглеру); ⊙ - пшеница (по Вельшофу); ■ - бобы (по Уэттаки).

формулах для H_r и ΔH принята $v_m = v - v_{sr}$. Расчет сопротивлений по такой скорости материала не противоречит физической сущности процесса, так как при этом изменяется только числовые значения f_r и ζ_r .

Обработка экспериментальных данных показывает, что функциональная зависимость f_r от $\frac{v_m}{v_{sr}}$ при гидротранспорте песка, руды,

ячменя и зеленого солода аналогична зависимости этих величин для пневмотранспорта. Так, например, для гидротранспорта ячменя и зеленого солода при $9 < \frac{v_m}{v_{sr}} < 18$

$$f_r = \frac{2,5}{\left(\frac{v_m}{v_{sr}}\right)^{0,5}}$$

Аппроксимируя кривую рис.4, получаем уравнение для расчета f_r при горизонтальном транспорте различной концентрации продуктов зерноперерабатывающих предприятий в стальных трубопроводах ;

$$\text{при } 0,15 < \frac{v_m}{v_{sr}} < 0,50$$

$$f_r = \frac{0,002}{\left(\frac{v_m}{v_{sr}}\right)^{0,55}} ; \quad (26)$$

$$\text{при } \frac{v_m}{v_{sr}} \geq 0,50 \quad f_r = 0,003 = \text{const.}$$

Сравнивая коэффициенты f , λ_m и κ , получаем

$$f = \lambda_m \frac{v^2}{v_m v'} = \kappa \lambda \frac{v^2}{v_m v'}$$

Это еще раз подтверждает, что расчеты взвесенесущих потоков по λ_m и κ , а следовательно по λ_{cm} , являются частными случаями расчета методом ОТИП.

При расчете потерь давления на разгон твердых частиц необходимо знать величину a , входящую в уравнение (I). Теоретическое и экспериментальное определение этого коэффициента проведено М.М.Гернетом и М.Г.Григорьевым применительно только к некоторым зернистым материалам и не имеют общего решения. Экспериментальное определение величины H_p графически, по эюре давления вдоль материалопровода, дает достаточную для практики точность только при горизонтальном транспорте, где сумма $H_r + H_1 + \Delta H$ практически линейна по длине трубопровода. Линейность вызвана тем, что согласно уравнениям (4), (8) и (25)

$$H_T + \Delta H = \frac{G}{\omega} \ell \left[\frac{f_r}{\rho c} \left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right) \frac{v_m}{2} + \frac{2 v_{sr}'}{10^3 g} \right]$$

На разгонном участке, где v_m меньше, а согласно уравнению (26) или рис. 4 f больше, произведение $f_r v_m$ практически не изменяется. Таким образом, при горизонтальном транспорте все потери давления, кроме H_p , линейны и тогда величина H_p , полученная графическим способом, будет практически равна действительной её величине.

При вертикальном транспорте величина H_g , согласно уравнению (2), на разгонном участке переменна по высоте. Поэтому графический способ определения H_p дает значительные погрешности.

Учитывая это, в работе определяли потери давления на разгон твердых частиц по балансу затраченной энергии, т.е. по разности измерений экспериментом величины $H_{св}$ и суммы, состоящей из экспериментальной величины H_2 , и величин H_1 , H_g , ΔH , рассчитанных по уравнениям (1 + 8). Обработка экспериментальных данных проведена в координатах

$$\frac{H_p}{\frac{G}{\omega} v_m} = \varphi \left(\frac{v_m'}{v_{sr}'} \right).$$

Эта система координат выбрана на том основании, что при отсутствии вращения $H_p = \frac{G}{\omega} \frac{v_m}{2}$, а интенсивность вращения частиц согласно исследованиям, например, М.Г. Григорьева, А.М. Дзидзио и Уэттаки зависит от v и v_s , т.е. от величин, определяющих v_m .

Обработка результатов экспериментальных исследований горизонтального транспорта, полученных в реферируемой работе и работе других авторов, показывает, что при расчете $H_T + \Delta H$ по величине v_m , равной скорости движения частиц в конце

разгонного участка, где $v_m = v - 0,34 v_{sr}'$.

$$H_p = 0,85 \frac{G}{\omega} v_m. \tag{27}$$

II Расчет H_p по этому уравнению, полученному по балансу энергии, хорошо согласуется с величинами H_p , определенными графическим методом по эпюре давления вдоль трубопровода. На достаточно высокую сходимость этого уравнения с графическим способом определения H_p не только для круглых трубопроводов, но и для трубопроводов других форм поперечного сечения указывает в своих исследованиях В.П. Коцуба.

Приравнивая правые части уравнений (27) и (1), получаем

$$a = 0,7 v_m^2.$$

откуда следует, что затрата энергии на вращение частиц при их разгоне значительна и поэтому ее не следует пренебрегать.

По своей сущности потери давления на разгон частиц не должны зависеть от направления движения при условии равенства конечных скоростей и нагрузки $\frac{G}{\omega}$. Поэтому уравнение (27) должно быть справедливо и для вертикального транспорта при условии подстановки в него своей скорости материала в конце разгонного участка, т.е. $v_m = v - v_s'$.

Подставляя правую часть уравнения (27) в уравнение (9) и рассчитывая по нему $H_{св}$, видим, что расчетное значение меньше экспериментального. При этом расхождение тем больше, чем больше v_s' . Для пшеницы расхождение в ΔH_p значительно больше, чем при транспорте муки при одинаковых нагрузках на материалопровод.

Обработка экспериментальных данных в координатах

$$\frac{H_p}{\frac{G}{\omega} v_m} = \varphi \left(\frac{v_m'}{v_s'} \right)$$

показывает, что для вертикального транспор-

та

$$H_p = \frac{G}{\omega} (0,85 v_{sr}' + 0,55 v_s'). \quad (28)$$

Разность в H_p по уравнениям (28) и (27) равна

$$\Delta H_p = 0,55 v_s' \frac{G}{\omega}. \quad (29a)$$

Эта разность (ΔH_p) вызвана тем, что расчет H_p в уравнении (9) проводили по конечной скорости $v_{sr}' = v - v_s'$. Поэтому потери ΔH_p должны быть равны неучтенным потерям давления на подъем, так как на разгонном участке $v_{sr}' < v - v_s'$. Эти потери представляют

$$\Delta H_g = \frac{G}{\omega} g \ell_p \left(\frac{1}{0,8 v_{sr}} - \frac{1}{v_{sr}'} \right), \quad (29)$$

где $0,8 v_{sr}$ - средняя скорость движения твердых частиц на разгонном участке вертикального материалопровода.

Подставляя в уравнение (29) вместо ℓ_p его значение из уравнения (23), получим

$$\Delta H_g = 0,01 \alpha^5 \left(\frac{g}{\alpha} \right)^{1/2} \frac{v}{v - v_s'} v_s' \frac{G}{\omega}. \quad (30)$$

Рассчитывая ΔH_g по уравнению (30) при $\alpha = 0,90-0,95$ для крупных частиц с большой v_s' , видим, что в зоне рабочих скоростей охлаждающей среды, для которых получено уравнение (28), величина $0,01 \alpha^5 \left(\frac{g}{\alpha} \right)^{1/2} \frac{v}{v - v_s'}$ практически равна 0,55, т.е. $\Delta H_g \approx \Delta H_p$.

Для мелких частиц, для которых v_s' мало, указанная величина больше 0,55. Однако, вследствие того, что v_s' мало, ΔH_g незначительно и практически соответствует значению ΔH_p в уравнении (29a).

Таким образом, эксперимент подтверждает независимость H_p от направления движения взвешенесущего потока. Однако для расче-

та $H_{с.в.}$ при вертикальном транспорте по скорости частиц в конце разгонного участка необходимо, как это было указано выше, к правой части уравнения (9) добавить $\Delta H_g = 0,55 v_s' \frac{G}{\omega}$.

Результаты расчета вертикального транспорта не изменятся, если величину ΔH_g ввести не в уравнение (9), а в уравнение (27), т.е. потери давления H_p рассчитывать по уравнению (28).

Для облегчения расчета уравнения (27) и (26) можно привести к виду:

$$H_p = 0,85 \frac{G}{\omega} (v - 0,5 v_s');$$

$$H_p = 0,85 \frac{G}{\omega} (v - 0,35 v_s').$$

Учитывая, что при горизонтальном движении взвешенесущих потоков без отложений расчет H_p и ΔH ведут по $v_{sr}' = v - v_{sr}'$ и что $0,5 v_s' = 0,35 v_{sr}'$, то H_p можно определять из уравнения (28), заменив в нем v_s' на v_{sr}' и после простых преобразований получить одно уравнение, дающее достаточную точность для горизонтального и вертикального (с учетом ΔH_g) транспорта

$$H_p = 0,3 \frac{G}{\omega} (2,8 v - v_s'); \quad (31)$$

для горизонтального транспорта v_s' заменить на v_{sr}' .

На рис.5 приведена зависимость $\frac{\omega H_p}{G v_{sr}'}$ от $\frac{v_{sr}'}{v_s'}$, полученная экспериментально по балансу затраченной удельной энергии для горизонтального и вертикального транспорта; кривая построена по уравнению (31).

Дополнительные потери полной удельной энергии охлаждающей среды при транспорте твердых частиц в фасонных деталях рассматриваются также с позиций гидросаэродинамики. От суммарных

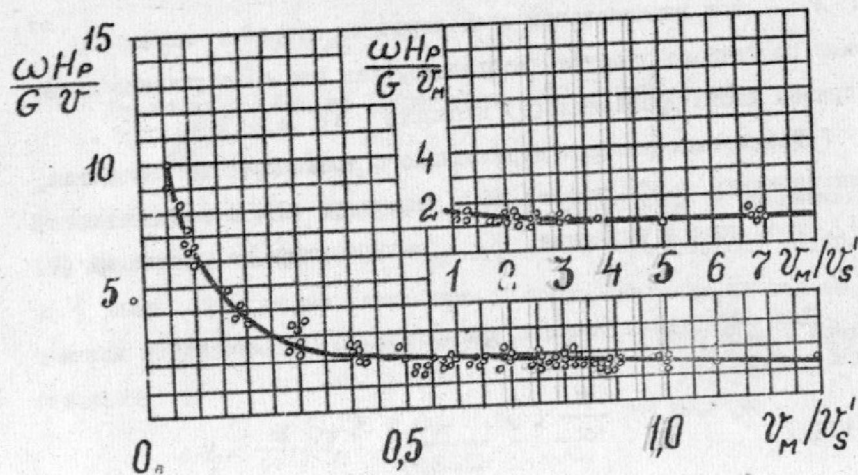


Рис. 5.

потерь давления, имевших место при движении взвесенесущих потоков в фасонной детали, например отводе, снимают потери H_2 , ΔH , H_T и H_d , а остальные относят к местным сопротивлениям. В этом случае согласно уравнению (5)

$$\zeta_m = \frac{H_{mc}}{\frac{G}{\omega} \frac{v_m}{2}}$$

Наименьшее значение ζ_m для отвода будет при ориентации его в горизонтальной плоскости, так как в этом случае v_m до отвода и после него (без учета торможения) будут одинаковы. Наибольшее - при переходе с вертикального направления в горизонтальное, так как при переходе частиц в горизонтальное направление скорость их будет больше, чем в вертикальном.

Опыт показывает, что для отводов, при прочих равных условиях, $\zeta_m = \varphi \left(\frac{v}{v_{cr}} \right)$. Поэтому расчет потерь давления в отводе можно проводить по уравнению

$$H_{mc} = \zeta_m \frac{G}{\omega} \frac{v}{2} \quad (32)$$

Обработка экспериментальных данных показывает, что

$$\zeta_m = 0,19 \left(\frac{v}{v_{cr}} \right)^{-0,51} f_m^{0,4} \left(\frac{2}{2-d} \right)^2 (0,50 + BC) EM \left(\frac{2}{d} \right)^{0,4} \frac{v_s'}{(gd)^{0,5}} \quad (33)$$

- где f_m - коэффициент внешнего трения частицы о стенки трубопровода ;
 B - коэффициент для отвода с горизонтального направления в вертикальное и, наоборот; B соответственно равно 0,35 и 1,0 ;
 C - коэффициент, значение которого обусловлено углом наклона материалопровода к горизонту (φ) ; для $\varphi < 45^\circ$ $C = \sin^{1,3} \varphi$, для $\varphi > 45^\circ$ $C = \sin^{2,6} \varphi$;
 0,5 - коэффициент, соответствующий отводу, расположенному в горизонтальной плоскости ;
 E - коэффициент, учитывающий неполноту разгона частиц после отвода. В тех случаях, когда после отвода имеет место ограниченная длина трубопровода, величину E можно брать из таблицы, полученной соответственно исследованиям Ф.Г.Зуева.

φ в метрах	1	2	3	4	5	6
E	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0

По нашим исследованиям при присоединении отвода непосредственно в отделитель $E = 0,15 \div 0,18$.

M - коэффициент, зависящий от угла поворота отвода (α);
 при $\alpha < 65^\circ$ $M = \sin''\alpha$, при $\alpha > 65^\circ$ $M = \sin^{2,5}\alpha$,
 при $\alpha = 90^\circ$ $M = 1$.

Как следует из уравнения (33), ζ_n не зависит от радиуса поворота. Однако это не означает, что $H_{сн}$ в отводе не зависит от R/λ . Чем больше радиус поворота, тем меньше ζ_n , но больше H_1 , ΔH и H_2 .

Несмотря на наличие в уравнении (33) симплекса $(\frac{\rho_{сн}}{\rho})^{0,51}$, величина ζ_n практически не зависит от $\rho_{сн}$. Это вызвано тем, что $v_{сн}'$, входящее в уравнение (33), в свою очередь, как это видно из уравнения (13), зависит от $(\frac{\rho_{сн}}{\rho})^{0,50}$.

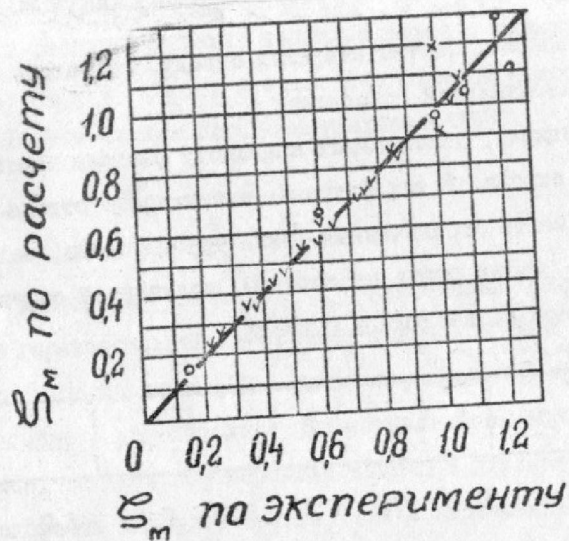


Рис. 6.

v - по исследованиям К.Р.Реппа, \circ - по исследованиям автора; x - по исследованиям Ф.Г.Зуева.

Сходимость расчетных и экспериментальных величин видна

из рис. 6. Независимость ζ_n от $\frac{R}{\lambda}$ и $\rho_{сн}$ хорошо подтверждают исследования К.Р.Реппа и Ф.Г.Зуева.

Применительно к пневмотранспорту на зерноперерабатывающих предприятиях уравнение (33) приобретает более удобный для расчета вид

$$\zeta_n = 0,285 f_m^{0,4} (0,50 + \beta c) E M \left(\frac{\lambda}{d}\right)^{0,4} \quad (34)$$

Рассмотренный общий случай расчета сопротивления взвешенных потоков можно применительно для конкретных условий значительно упростить. Например, как частные случаи, рассмотрим расчет гидравлических сопротивлений, применительно к зерноперерабатывающим предприятиям.

1. При $\beta < 0,10$, что чаще всего встречается в практике расчета взвешенных потоков на зерноперерабатывающих и пищевых предприятиях, уравнение (9) принимает вид:

для вертикальных потоков

$$H_{сн} = H_2 + \frac{G}{10} \left[0,3(2,8v - v_{сн}') + l \left(\frac{g}{v_{сн}} + \frac{f v_{сн}}{\lambda \lambda} + \frac{\rho (v_{сн}')^2}{2 \rho_{сн} v_{сн} \lambda} \right) \right];$$

для горизонтальных потоков

$$H_{сн} = H_2 + \frac{G}{10} \left\{ 0,3(2,8v - v_{сн}') + l \frac{f_{сн}}{\rho} \left[g \frac{\lambda_r v_{сн}}{2 v^2} + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{\rho_{сн} \lambda} \rho v_{сн}' \right] \right\}$$

При наличии в материалопроводе отводов их сопротивление следует рассчитывать по уравнениям (33) или (34).

2. При вертикальном пневмотранспорте пшеницы и продуктов ее размола в стальных бесшовных трубах при высоте материалопровода более 10 м в диапазоне $\lambda = 50 - 200$ мм и скорости воздуха 18 - 30 м/с, что практически всегда имеет место на мельничных предприятиях, потери давления в материалопроводе можно рассчитывать по формуле

$$N_{сн} = N_k + \frac{G}{\omega} g \left(\frac{0,023}{g^{0,75}} l + 0,085 v \right) \quad (35)$$

полученной, как частный случай уравнения (9).

Внешнее несоответствие формулы (35) требованиям размерности вызвано не потерей физического смысла ее, а заменой величины $\frac{1}{v} + \frac{0,0035}{g^{0,75}} v$ в указанных пределах v , g и l значением $\frac{0,023}{g^{0,75}}$.

3. Рассматривая аэрозольтранспорт муки как частный случай взвесенесущих потоков, можно получить зависимость

$$D = \left(1,27 \frac{1}{l} g \frac{G l}{\alpha N_{сн} v_H} \right)^{0,5} \quad (36)$$

- где v_H - начальная скорость воздуха;
 α - коэффициент, учитывающий потери на разгон, выраженный в долях $N_{сн}$; для $v_H < 5$ м/с $\alpha = 1$, при $v_H > 5$ м/с $\alpha = 0,8 + 0,9$; меньшее значение α для $l = 10 - 13$ м, большее для $l > 13$ м;
 η - коэффициент полезного действия пневмотранспортирования.

Для горизонтального транспорта

$$\begin{aligned} \text{при } v_H = 3 - 7 \text{ м/с} & \quad \eta_r = 0,75 = const. \\ v_H = 7 - 12 \text{ м/с} & \quad \eta_r = 1,03 - 0,040 v_H. \end{aligned}$$

Для вертикального транспорта

$$\begin{aligned} v_H = 2 - 4 \text{ м/с} & \quad \eta_{в} = 0,85 = const. \\ v_H = 4 - 12 \text{ м/с} & \quad \eta_{в} = 1,05 - 0,050 v_H. \end{aligned}$$

Пользуясь уравнением (36), можно легко и быстро рассчитывать оптимальный D (при заданной v_H) для вертикального и горизонтального аэрозольтранспорта муки в стальных бесшовных трубах, т.е. указать диаметр трубопровода, при котором будет

полностью использовано располагаемое давление $N_{сн}$ при максимальном к п д пневмотранспортирования. Уравнение (36) также позволяет производить и другие расчеты, связанные с гидродинамической аэрозольтранспорта муки.

В реферируемой работе показано, что принятые в настоящее время методы расчета гидротранспорта, например, метод Дюрана и метод С.А.Коржаева, являются частными случаями метода ОТИШ.

Исследования к п д пневмотранспортирования приводят к выводу, что применение материалопроводов кольцевого поперечного сечения и создание для них соответствующих приемников позволит снизить энергоемкость пневмотранспорта и рабочие скорости воздуха, в частности, для продуктов зерноперерабатывающих предприятий.

Результаты проведенных исследований показывают, что каждой скорости охлаждающей среды соответствует своя максимальная величина G , при которой осуществляется устойчивый транспорт. При нагрузке больше этой величины устойчивый транспорт нарушается, и при дальнейшем росте G , транспорт прекращается.

Экспериментально полученные эпюры скоростей охлаждающей среды подтвердили, что в определенном интервале величин β эпюра скоростей охлаждающей среды приобретает такую форму, при которой основная масса жидкости движется в центральной части вертикального трубопровода и поэтому частицы, находящиеся у стен, не получают достаточной энергии для своего движения. При меньших и больших β эпюра скоростей более выравнена и скорость жидкости у стен трубопровода достаточна для передачи твердым частицам необходимой энергии. Так как при прочих равных условиях величина β зависит от v_H , однозначно связанной с расходной скоростью жидкости, то существует такая зона D , при которой транспорт невозможен. Вследствие того, что v_H по высоте трубопровода различ-

на, то "завал" наступает в нижней части его, т.е. у приемника. Поэтому при создании приемников необходимо применять такие устройства, которые способствуют созданию более выравненной эпюры скоростей оживающей среды.

Для приемника типа ОТИ или близким к нему, по степени выравненности эпюры скоростей оживающей среды, другим приемником, например, типа "сопло" получена обобщенная зависимость для расчета V_{min} в вертикальных трубопроводах круглого поперечного сечения

$$V_{min} = V_s + 1,35 \left(\frac{G}{\omega} \frac{V_s}{\rho_{sr}} \frac{\beta}{\alpha} \right)^{0,5} \quad (37)$$

Для горизонтального пневмотранспорта зернистых материалов без заиливания минимальную рабочую скорость воздуха можно рассчитывать по уравнению, полученному из уравнения (22)

$$V_{min} = 0,35 \left(\frac{G}{\omega \rho} \right)^{0,2} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{0,266} V_{sr}^{0,8} \quad (38)$$

При скорости воздуха меньше V_{min} транспорт будет осуществляться с заиливанием.

Для горизонтального гидротранспорта пищевых продуктов

$$V_{min} = \frac{5,7}{\left[\frac{\omega \rho_{sr}}{G(\frac{\beta}{\alpha} - 1)} \right]^{0,2}} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{0,266} V_{sr}^{0,8} \quad (39)$$

Сравнение результатов расчета V_{min} по уравнению (39) и экспериментальными данными М.М.Коробова для гидротранспорта ячменя и зеленого солода показывает хорошую сходимость.

Результаты исследования пневмотранспорта в трубопроводах, имеющих кольцевое поперечное сечение, указывают на возможность снижения минимальной рабочей скорости и, в связи с этим, энергоемкости пневмотранспортирования материалов.

Снижение V_{min} при неизменной площади поперечного сечения материалопровода, приводит к уменьшению расхода воздуха, увеличению концентрации и снижению энергоемкости пневмотранспорт-

ной установки. Однако, при пневмотранспорте в размольных отделениях мельниц, где воздух выполняет не только транспортные операции, например, осуществляет аспирацию вальцовых станков, чрезмерное снижение расхода воздуха в пневмотранспортной сети может привести к конденсации влаги и нарушению технологического процесса. В этих условиях исходным расчетным параметром пневмотранспортной установки должна быть величина расхода воздуха, обеспечивающая надежную аспирацию вальцового станка, а не μ или β , как это принято в настоящее время.

Так как расход воздуха в материалопроводе определяется произведением V и ω , то заданную величину Q можно обеспечить снижением V при одновременном увеличении β . Преобразуя уравнение (35) как функцию от Q видим, что

$$H_{св} = V \left[\frac{0,45}{Q^{0,5}} \lambda \beta \rho V^{0,5} + \beta \frac{G}{Q} \left(\frac{0,021}{Q^{0,33}} V^{0,33} + 0,025 V \right) \right]$$

т.е. при заданной величине Q , потери давления в пневмотранспортной сети снижаются с уменьшением V . Поэтому работа на пониженных рабочих скоростях воздуха приводит к снижению энергоемкости пневмотранспортных установок даже в тех случаях, когда необходимо сохранить заданную величину расхода воздуха.

Итак, для предотвращения конденсации влаги в вальцовых станках и самотеках расчет пневмотранспортной сети по магистральному направлению следует вести по заданной производительности G и необходимому расходу Q ; при этом величины μ или β определяются как следствие величин V , β и G .

Расчет диаметра материалопровода, представляющего ответвление к магистральному направлению следует проводить на общих основаниях аэродинамики и для сокращения расхода металла, скорость воздуха в нем брать выше минимально допустимой с таким расчетом, чтобы расход воздуха обеспечивал должную степень охлаждения

вальцового станка, а сопротивление было равно действующему давлению в магистральном направлении,

Поэтому в размольных отделениях мельниц не всегда следует стремиться осуществлять транспортирование материала во всех стоянках пневмостранспортной сети на одинаково малых скоростях воздуха.

Применение материалопровода кольцевого поперечного сечения совместно с модернизированными приемниками ОТИ позволяет, как показали исследования, значительно снизить минимальную рабочую скорость воздуха и повысить к п д пневмотранспортирования для мелкодисперсных материалов и в меньшей степени для зернистых.

Наибольшее снижение V_{min} имеет место при отношении внутреннего диаметра трубопровода к наружному в пределах 0,20-0,22, что практически не снижает живого сечения материалопровода. При этом отношении $\frac{D_2}{D_n}$ и модернизированном приемнике ОТИ минимальную рабочую скорость воздуха и величину H_z можно рассчитывать по уравнениям

$$V_{min} = V_s + 1,35 \left(\frac{D_n - D_2}{D_n} \right)^2 \left(\frac{G}{\rho \omega} \frac{V_s}{r_n} \frac{D_n - D_2}{d} \right)^{0,5}$$

$$H_z = \left[H \left(1 + \frac{D_2}{D_n} \right) \right]^{1,1} \approx 1,23 H''$$

где H - потери давления в трубопроводе круглого поперечного сечения.

Исследования показали, что расчет потерь давления на торможение можно рассчитывать по общему уравнению (3), заменив в нем D на $D_n - D_2$.

В случае $\frac{D_2}{D_n} = 0,20-0,22$ и замене в уравнении (3) D на $(D_n - \frac{D_2}{2})$, коэффициент f можно принимать равным для круглых материалопроводов при пневмотранспорте продуктов размола зерна.

При пневмотранспорте пшеницы f следует увеличивать по отношению к материалопроводам с круглым поперечным сечением на (30-50)% при

$$\frac{V_{pr}}{V_s} = 0,5 + 1,5 \text{ и принимать их равными при } \frac{V_{pr}}{V_s} > 2.$$

Расчет сопротивлений остальных слагаемых, входящих в уравнение (9), следует проводить по уравнениям (2), (8) и (31) при скорости материала в конце разгонного участка, определяемой как разность скорости воздуха и скорости витания частиц в кольцевом канале (уравнения 20 и 21). Для мелкодисперсных материалов V_s определять по уравнениям (16) и (17).

Исследования показали, что применение материалопроводов поперечного кольцевого сечения увеличивает к п д пневмотранспортирования до (60+70)% при вертикальном пневмотранспорте продуктов размола и до 20% для пшеницы. Относительно малое повышение к п д пневмотранспортирования для пшеницы не означает неэкономичности применения кольцевых материалопроводов в зерноочистительных отделениях мельниц, если совместить пневмотранспорт с технологическим процессом пневмосепарации.

Исследования, приведенные в реферируемой работе и исследования других авторов показывают, что при существующем способе пневмосепарирования - в вертикальных каналах - технологическая эффективность зависит от отношения расхода воздуха к количеству сепарируемого зерна ($\frac{Q}{G}$). Напр. мер, для достижения эффективности очистки зерна пшеницы с $E = (70-80)\%$ расход воздуха должен составлять (0,6-0,9) м³/кг (рис.7, кривая I).

При пневмотранспорте в зерноочистительных отделениях мельниц обычно принимают $\mu \approx 5$, что соответствует $\frac{Q}{G} = 0,17 \text{ м}^3/\text{кг}$. Такой расход воздуха обеспечит технологическую эффективность пневмосепарирования в вертикальных каналах не более (30-35)%, что подтверждается многолетней практикой эксплуатации существующих пневмосепараторов. Таким образом, расход воздуха в пневмотранспортных установках зерноочистительных отделениях недостаточен

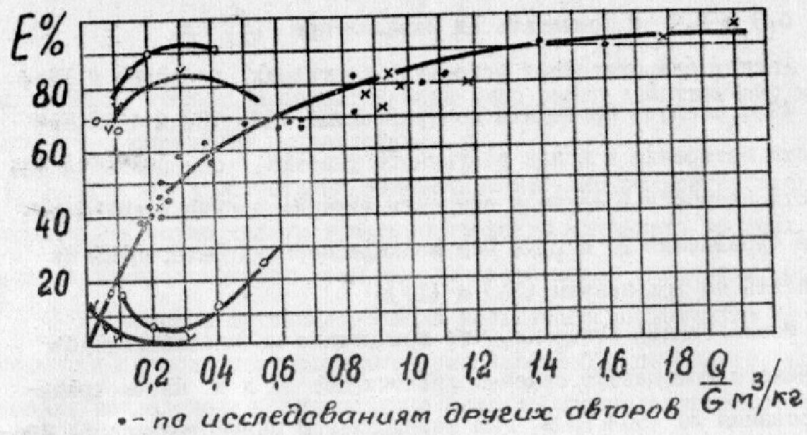


Рис. 7.

для получения высокой технологической эффективности при сепарации в вертикальных каналах. Увеличение расхода воздуха для получения $E \approx 80\%$ снизит концентрацию смеси в материалопроводе примерно до единицы, что приведет к резкому повышению расхода энергии на пневмотранспорт и увеличению воздухообмена в здании мельницы. Такое положение не благоприятствует широкому распространению пневмотранспорта в зерноочистительных отделениях мельниц.

Итак, применяемый в настоящее время на зерноперерабатывающих предприятиях способ воздушной сепарации в вертикальных каналах, хорошо оправдавший себя при механическом транспорте, не может дать должной технологической эффективности при пневмотранспорте. Применение в зерноочистительных отделениях пневмотранспорта взамен механического без совмещения его с пневмосепарацией экономически себя не оправдает, т.к. приведет к резкому повышению энергозатрат и воздухообмену в здании не улучшив технологического процесса.

Пневмотранспорт в зерноочистительных отделениях мельниц получит распространение лишь в том случае, когда будет создан

пневмосепаратор, дающий должную технологическую эффективность при значительно меньших расходах воздуха, чем сепараторы с вертикальными каналами. Только при этом условии, применение пневмотранспорта в зерноочистительных отделениях мельниц позволит воспользоваться его санитарно-гигиеническими и эксплуатационными преимуществами.

Исследования показали, что одной из основных причин низкой технологической эффективности пневмосепараторов является большая плотность зернового потока, через которую отделяемые примеси не могут пройти. Анализ результатов изучения вертикальных взвешенных потоков показал, что плотность их в конце разгонного участка при рабочей скорости воздуха 20 м/с и концентрации $\beta = 5$ составляет

$$\beta = \frac{v'}{v_{\text{ср}}} \frac{\rho}{\rho_{\text{ср}}} \beta' = 0,0092.$$

Такая плотность зернового потока, в каждом сечении материалопровода на высоте более ℓ_p , вполне удовлетворяет требованиям пневмосепарирования, т.к. достаточна для свободного пропуска примесей через зерновую массу. Следовательно, внутри пневмотранспортного трубопровода созданы условия, благоприятные для процесса пневмосепарирования зерна. Для этой цели достаточно предварительно отделенный воздушный поток направить поперек движущейся по инерции зерновой струи. Однако конструктивное оформление такого сепаратора вызывает ряд затруднений. Возможны и другие конструктивные оформления указанного способа пневмосепарирования.

Одним из возможных способов использования благоприятных условий объемно-разрыхленного состояния движущегося зернового потока при пневмотранспорте следует считать способ преобразования объемно-разрыхленного состояния в разрыхленно-поверхностное мало-слойное состояние. Такой вариант наиболее прост в конструктивном

оформлении и дает возможность регулирования технологических и аэродинамических параметров сепарирования, не изменяя параметров пневмотранспорта.

Разработанный способ пневмосепарации заключается в том, что зерновому потоку, с помощью отражателя, придают куполообразную форму, пригодную для беспрепятственного пропускa отделяемых примесей. Пропуск предварительно отделенного воздуха осуществлен непосредственно у отражателя. При этом процесс пневмосепарации является конечным этапом пневмотранспорта, а конструкция не требует наличия емкости для завершения процесса пневмотранспорта и питающего устройства для ввода зерновой смеси в вертикальный пневмосепарирующий канал.

Итак, отличие предложенного способа пневмосепарации зерна состоит в следующем:

1. более полное использование благоприятных для сепарирования условий, имеющих место при пневмотранспорте, что позволяет значительно повысить технологическую эффективность при малых расходах воздуха;
2. создание малослойного зернового потока с более равномерной разрыхленностью, обеспечивающей беспрепятственный выход частиц аэродинамических примесей;
3. процесс сепарации является конечным этапом пневмотранспорта.

Разработанный совместно с А.М.Дзяджио и В.А.Князевым способ пневмосепарации и три конструкции пневмосепаратора защищены авторскими свидетельствами. Принципиальная схема одного из разработанных пневмосепараторов приведена на рис.8

Кривые 2 и 3 на рис.7 представляют зависимость F от $\frac{Q}{G}$ для примесей, имеющих различные аэродинамические свойства и геометрические показатели. Кривые 4 и 5 изображают соответствующий унос

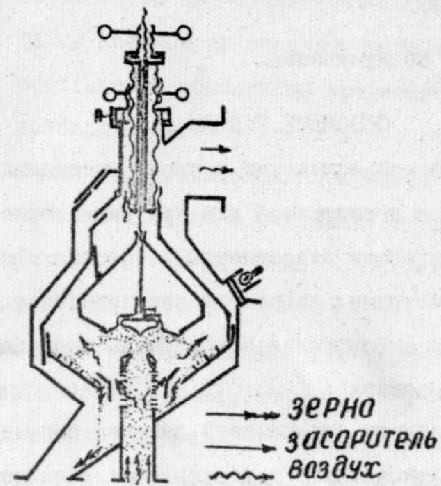


Рис. 8.

нормального зерна в отводы (Z). Исследования показали, что на F влияют отношение диаметра материалопровода к диаметру пневмосепаратора, отношение размера пневмосепаратора к площади отражателя, а также степень засоренности зерна. Однако характер кривых $F = \varphi\left(\frac{Q}{G}\right)$ остается неизменным и при малых величинах $\frac{Q}{G}$ значение F всегда больше, чем у пневмосепараторов с вертикальным каналом.

Проведенные исследования позволили получить расчетные зависимости для проектирования таких пневмосепараторов.

Многолетняя производственная эксплуатация пневмосепараторов ОТИ на мельнице Одесского комбината хлебопродуктов показала высокую технологическую эффективность, надежность в эксплуатации и другие преимущества разработанного способа пневмосепарации. Более эффективная очистка зерна и уменьшение боя его позволили увеличить выход муки на 0,3%.

Опыт, производственной эксплуатации пневмосепараторов ОТИ на Киевском просозаводе показал высокую технологическую эффективность (70-75)%, небольшое дробление пшена, надежность в эксп-

луатации и простоту обслуживания.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований показано, что с достаточной для практики точностью кинематическую структуру и режим взвесенесущих потоков можно характеризовать тремя параметрами; скоростью стесненного витания (v_c'); изменением потерь на собственное перемещение оживающей среды (ΔH) и коэффициентом торможения (f).

2. Величину скорости стесненного витания сыпучей массы можно описать двумя уравнениями - для зернистых и мелкодисперсных частиц - как функцию от $\frac{d}{\delta}$, β и формы частиц. Основным линейным размером оживающей среды взвесенесущего потока при определении критерия Рейнольдса следует принимать гидравлический радиус - равный по величине отношению объема твердого материала к смоченной поверхности.

3. Величина ΔH с достаточной степенью точности описывается одним уравнением для вертикальных взвесенесущих потоков и одним - для горизонтальных, при условии движения без заиливания дна трубопровода.

4. Коэффициент торможения (f) зависит от фрикционных свойств твердых частиц и материала трубопровода, физических свойств оживающей среды, скорости движения частиц и скорости стесненного витания. Коэффициент f также учитывает потери энергии частиц при возможном их соударении и поперечном перемещении относительно стенок трубопровода. Поэтому коэффициент f необходимо определять экспериментально при изменении указанных свойств твердых частиц, материалопровода и оживающей среды.

5. Вследствие того, что величины v_c' и ΔH проще описать обобщенными уравнениями, чем кинематическую структуру и режим

взвесенесущих потоков, то для составления обобщенных уравнений гидродинамики таких потоков их следует брать за основу. При таком подходе к составлению обобщенных уравнений для их инженерного применения необходимо экспериментально определять только коэффициент торможения, что значительно сокращает сроки исследования для внедрения пневматического и гидравлического транспорта различной концентрации сыпучих материалов, применяемых в различных отраслях народного хозяйства.

6. Затрата полной удельной энергии твердых частиц при их перемещении не зависит от режима, кинематической структуры и физических свойств оживающей среды. Оживающая среда является лишь источником, из которого твердые частицы получают энергию, затрачиваемую ими при своем движении. Поэтому расчет величины полной удельной энергии, полученной твердыми частицами на собственное перемещение следует вести независимо от свойств оживающей среды, т.е. по отношению к единице их объема, а потери полной удельной энергии оживающей среды будут больше на величину потерь давления, затраченных ею на собственное перемещение.

7. Эпюра скоростей оживающей среды, имеющая взаимосвязь с величиной насыщения потока твердыми частицами, определяет способность жидкости (газа) передавать свою энергию всем твердым частицам. Поэтому существуют определенные зоны δ' и β , при которых устойчивое движение взвесенесущих потоков невозможно.

8. Полученные в работе обобщенные зависимости расчета, как частные случаи, можно представить в виде уравнений Гастерштадта, С.А.Коржаева или Дюрана, т.е. уравнений широко применяемых при расчете пневматического и гидравлического транспорта.

9. Величины v_c' , ΔH и f с достаточной для практики точностью описывают режим и кинематическую структуру взвесенесущего

потока не только при прямолинейном его движении, но и при поворотах. В работе получено общее уравнение для расчета потерь давления в отводах как функция от угла поворота, ориентации в пространстве и концентрации потока.

10. Полученными обобщенными уравнениями можно воспользоваться при расчете пневматического и гидравлического транспорта, независимо от конфигурации пневмотранспортных установок и концентраций взвешенных потоков.

11. Применительно к зерноперерабатывающим предприятиям получены, как частные случаи общих уравнений, простые формулы для расчета вертикального пневмотранспорта на зерноперерабатывающих предприятиях и аэрозольного транспорта муки.

12. Анализ полученных обобщенных уравнений взвешенных потоков показывает пути для снижения минимальной рабочей скорости воздуха в пневмотранспортных установках зерноперерабатывающих предприятий, не ухудшая при этом условий аспирации вальцовых станков.

13. Исследования общих закономерностей гидродинамики взвешенных потоков позволило найти одну из лучших конфигураций поперечного сечения трубопровода для уменьшения рабочей скорости воздуха при вертикальном внутрицеховом мельничном пневмотранспорте.

14. Вскрыта причина низкой технологической эффективности существующих в настоящее время на зерноперерабатывающих предприятиях пневмосепараторов.

15. Изучение общих закономерностей и явлений гидродинамики взвешенных потоков позволили создать новый способ пневмосепарации для зерноперерабатывающих предприятий, использующих пневмотранспорт. Созданные способ и конструкции пневмосепараторов, защищенные авторскими свидетельствами, длительное время применяются на

зерноперерабатывающих предприятиях и, как показала практика эксплуатации, обеспечивает технологическую эффективность порядка 70-75% при высокой надежности их работы.

16. Шестилетняя эксплуатация пневмосепараторов на мельнице №3 в г.Одессе показала, что ежегодный экономический эффект от внедрения четырех сепараторов составляет 13270 рублей при дополнительном выходе муки 12,5 тонн.

17. С целью дальнейших обобщений расчетных уравнений гидродинамики, связанных с решением инженерных задач, необходимы исследования, направленные на получение общих закономерностей коэффициента торможения с определяющими его параметрами.

РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Предложенный метод расчета взвешенных потоков может быть использован при проектировании пневмо-гидротранспортных установок, при исследовании взвешенных потоков и при наладке пневмо-гидротранспортных установок, а также при конструировании пневмосепараторов.

2. Предложенные способ и конструкции пневмосепараторов, работа которых длительное время (более шести лет) проверена в производственных условиях, могут быть применены не только на зерноперерабатывающих предприятиях, а и на других предприятиях, где воздушный поток одновременно выполняет транспортные и технологические операции.

3. Для снижения рабочей скорости воздуха, и вследствие этого, уменьшения вакуума в производственных зданиях, а также снижения энергоемкости пневмотранспорта, при сохранении надежности его работы, следует применять вертикальные материалопроводы кольцевого поперечного сечения с модернизированными приборами СИИ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора и в соавторстве

1. Аэродинамическое сопротивление кукурузы в початках. Вестник технической информации, Хлебоздат, №9, 1959.
2. Пневматический транспорт зерна и продуктов его размола. Сб. ЦБТИ Министерства хлебопродуктов СССР, 1958.
3. Исследование способа попутного сепарирования сыпучих материалов в условиях пневматического транспорта. Сб. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках. Одесса, 1967.
4. Скорости движения твердых частиц в вертикальных двухфазных потоках. Сб. Материалы Всесоюзной межвузовской конференции по процессам в дисперсных сквозных потоках. Одесса, 1967.
5. Аэромеханическое сепарирование зерна пшеницы в условиях внутрицехового пневмотранспорта. "Пищевая технология", №4, 1968.
6. Изменение скорости витания частицы в стесненных условиях. "Пищевая технология", №2, 1968.
7. О скорости свободного витания частицы при изменении физических свойств жидкости. "Пищевая технология", №3, 1968.
8. Расчет скорости витания и коэффициента сопротивления. "Нефть и газ", №9, 1968.
9. Расширение взвешенного зернистого слоя в восходящем потоке. "Нефть и газ", №7, 1968.
10. Потери давления при подъеме продуктов пневмотранспортом. "Мукомольно-элеваторная промышленность", №9, 1968.
11. Воздушный сепаратор для внутрицехового пневмотранспорта. "Мукомольно-элеваторная промышленность", №2, 1968.

12. Взвешивающая скорость частиц в горизонтальных трубопроводах. Сб. Одиннадцатое координационное совещание по промышленной вентиляции. М., 1969.
13. Плотность укладки монодисперсных шарообразных частиц. "Нефть и газ", №10, 1969.
14. Гидравлическое сопротивление твердой фазы в псевдоожиженном состоянии. "Нефть и газ", №11, 1969.
15. Полное давление, развиваемое вентилятором при работе его в сквозных дисперсных потоках. "Пищевая технология", №4, 1970.
16. Расчет потребной мощности для привода вентилятора, работающего в сквозных дисперсных потоках. "Пищевая технология", №3, 1970.
17. Новые модели пневмотранспортных сепараторов для зерна. "Мукомольно-элеваторная промышленность", №3, 1970.
18. Потери давления при движении двухфазных потоков на пищевых предприятиях. "Пищевая технология", №5, 1971.
19. Опыт эксплуатации пневмотранспортных сепараторов на Киевском просоизводе. "Мукомольно-элеваторная промышленность", №4, 1971.
20. Аэромеханическое сортирование продуктов дробления зерна в условиях внутрицехового пневмотранспорта. "Пищевая технология", №4, 1971.
21. Исследование гидравлического сопротивления двухкомпонентных потоков. Сб. Материалы второй Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", Одесса, 1971.
22. Определение скорости витания сыпучего материала в кольцевых каналах. "Нефть и газ", №11, 1971.
23. Деформация профиля эпюры воздушного потока в вертикальном трубопроводе в зависимости от наличия твердых частиц. Изв. АН МССР, Серия физико-технических и математических наук, №3, 1971.

24. Расчет плотности укладки сыпучих материалов в кольцевых материалопроводах. Сб. Трубопроводный транспорт и перспективы его применения в Курской области. Изд. МВССО РСФСР, Курск, 1972.
25. Гидравлическое сопротивление при аэрозольтранспорте муки в стальных трубопроводах. "Пищевая технология", №2, 1972.
26. Расчет потерь давления при вертикальном пневмотранспорте высокой плотности. "Нефть и газ", №10, 1972.
27. Расчет вертикального пневмотранспорта фосфата в круглых материалопроводах. Сб. Трубопроводный транспорт и перспективы его применения в Курской области. Изд. МВССО РСФСР, Курск, 1972.
28. Применение материалопровода кольцевого сечения для вертикального пневмотранспорта. "Пищевая технология", №3, 1972.
29. Расчет сопротивления вертикального внутрицехового мельничного пневмотранспорта. "Пищевая технология", №3, 1973.
30. Методические указания для расчета гидравлических сопротивлений взвешенных потоков методом ОТИПН. Изд. ОТИПН, Одесса, 1973.
31. Вертикальный пневмотранспорт древесных опилок. "Гидролизное производство", №1, 1973.
32. Снижение рабочей скорости воздуха при вертикальном пневмотранспорте. "Пищевая технология", №4, 1973.
33. Скорость движения зернового материала и минимальная скорость воздуха при горизонтальном пневмотранспорте. "Пищевая технология", №6, 1973.
34. Размеры кольцевого сечения материалопровода и рабочие скорости воздуха при вертикальном пневмотранспорте древесных опилок. "Гидролизное производство", №9, 1973.

35. Пневмотранспортный сепаратор для сыпучих материалов. Авторское свидетельство, №310696, Бюллетень изобретений, №24, 1971.
36. Пневмотранспортный сепаратор для сыпучих материалов. Авторское свидетельство №241972. Бюллетень изобретений, №14, 1969.
37. Способ сепарирования сыпучих материалов при пневматическом транспорте. Авторское свидетельство №189674. Бюллетень изобретений, №24, 1966.
38. Пневматический сепаратор для сыпучих материалов. Авторское свидетельство №188828. Бюллетень изобретений №22, 1966.

Доклады по теме диссертации

1. Всесоюзная межвузовская научная конференция по процессам в дисперсных сквозных потоках. Одесса, 1967.
2. Вторая Всесоюзная конференция "Механика сыпучих материалов" Одесса, 1971.
3. Всесоюзное совещание по вопросу "Основные направления развития пневматического транспорта на зерноперерабатывающих и комбикормовых предприятиях" Кишинев, 1970.
4. Всесоюзная конференция "Физические основы и методы инженерного расчета пневматического и гидравлического трубопроводного транспорта", организованная АН СССР, Калининград, 1971.
5. Одиннадцатое координационное совещание по промышленной вентиляции, Москва, 1969.
6. Научно-техническое совещание "Трубопроводный транспорт и перспективы его применения в Курской области, организованное Курским политехническим институтом и головным Советом по почвоведению и проблемам сельского хозяйства, Курск, 1972.
7. Все ежегодные научные конференции ОТИПН, проходившие с 1962 по 1973 годы.

Основные обозначения

- D - диаметр трубопровода, м
 D_n - внутренний диаметр наружного трубопровода, м
 D_e - наружный диаметр внутреннего трубопровода, м
 E - технологическая эффективность пневмосепаратора, %
 G_0 - массовый расход материала (производительность), кг/с
 G' - масса материала, находящегося в трубопроводе, кг
 R_2 - потери давления на единицу трубопровода, Па/м
 $R_r = \frac{1-\beta}{1+\frac{2}{\alpha}\beta}$ - гидравлический радиус, м
 V_{m1}^n - объем материала, м³
 V_T - объем трубопровода, м³
 V_{m2} - объем жидкости, м³
 H_k - потери давления при движении жидкости в свободном сечении трубопровода, Па
 ΔH - изменение потерь давления жидкой среды обусловленное наличием в трубопроводе твердых частиц, Па
 H_{cm} - потери давления в трубопроводе при движении смеси, Па
 H_p - потери давления на разгон частиц, Па
 H_g - потери давления на работу сил тяжести, Па
 H_T - потери давления на торможение частиц, Па
 Q - объемный расход жидкой среды, м³/с
 v - средняя по сечению трубопровода скорость жидкой среды,
 • м/с
 v' - истинная скорость жидкой среды, м/с
 v_{m1} - скорость движения материала, м/с
 \bar{v}_{m1} - средняя скорость движения материала, м/с
 v_s - скорость свободного витания, м/с

- v_s' - скорость стесненного витания, м/с
 v_{sr} - скорость жидкости, соответствующая началу отрыва частицы от стенки горизонтального трубопровода, м/с
 d - размер частицы, м
 l - длина материалопровода, м
 l_p - длина разгонного участка, м
 g - ускорение свободно падающего тела, м/с²
 f - коэффициент торможения
 ω - площадь поперечного сечения трубопровода, м²
 ρ - плотность жидкой среды, кг/м³
 ρ_m - плотность материала, кг/м³
 ρ_{cm} - плотность гидросмеси, кг/м³
 $\beta = \frac{V_m}{V_T} = \frac{v}{v_m} \frac{\rho}{\rho_m} \rho'$ - плотность взвесенесущего потока - отношение объема частиц к объему, занимаемого ими материалопровода
 $\beta' = \frac{V_m}{V_{m1}}$ - консистенция взвесенесущего потока - объемное соотношение частиц и жидкости в единице длины материалопровода
 $\eta = \frac{G l}{Q H_{cm}}$ - к п д пневмостранспортирования
 Φ - физические свойства частиц
 $Re = \frac{v R_r}{\nu}$ - инерционно-вязкостный критерий Рейнольдса
 $Ar = \frac{g R_r^3}{\nu^2} \left(\frac{\rho_m}{\rho} - 1 \right)$ - критерий Архимеда