

Авторед.  
Д 30  
Министерство высшего и среднего специального образования СССР

ОДЕССКИЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

---

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Инженер ДЕМЕНКО Олег Никитович

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВЕРТИКАЛЬНОГО ПНЕВМОТРАНСПОРТА ЗЕРНА  
И ЗЕРНОПРОДУКТОВ  
В КОЛЬЦЕВЫХ МАТЕРИАЛОПРОВОДАХ**

Специальность 05.02.14—Машины и агрегаты  
пищевой промышленности

**АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

ОДЕССА — 1974



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
Одесский технологический институт пищевой промышленности имени  
М.В. Ломоносова

На правах рукописи

инженер ДІМЕНКО Олег Никитович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПНЕУМОТРАНСПОРТА  
ЗЕРНА И ЗЕРНОПРОДУКТОВ ПОЛЫШЕВЫХ МАТЕРИА-  
ЛОВ ПРОВОДАХ

Исследователь 05.02.14 - Машины и агрегаты  
пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОНАХТ 25.07.11  
Исследование вертика



v012281

*с. в. 12281*

Одесский технологический  
институт пищевой промыш-  
ленности им. М. В. Ломоносова  
БИБЛИОТЕКА

*v 012281*

Одесса - 1974



Работа выполнена на кафедре "Промышленная вентиляция, гидравлика и насосы" Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор А.М. ДЗЯДЗИО;  
кандидат технических наук, доцент Г.Ф. КОСТЮК.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор М.П. КАЛИНУШКИН,  
кандидат технических наук, доцент Ф.А. ФЕДОРОВ.

Ведущая организация

Украинский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института комбикормовой промышленности.

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

Автореферат разослан 22 февраля 1974 г.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах направлять по адресу: г. Одесса-39 (270039), ул. Свердлова 112, Технологический институт пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Ученый секретарь

Совета к.т.н.

Л.А.Запорожец.



Директивы XXIV съезда Коммунистической партии Советского Союза по пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1971-1975 годы предусматривают дальнейшее широкое внедрение новейших достижений науки и техники, завершение комплексной механизации и автоматизации трудоемких процессов, оздоровление условий труда и повышение его производительности.

Большое внимание уделяется совершенствованию всех видов транспорта сыпучих материалов, в том числе и пневматического, который в настоящее время является наиболее прогрессивным, благодаря своим высоким технологическим и эксплуатационным показателям, таким как малогабаритность, герметичность, гигиеничность, высокая производительность и возможность автоматизации. На зерноперерабатывающих предприятиях и других отраслях промышленности пневматический транспорт повсеместно вытесняет механический. Пневматический транспорт позволяет совместить ряд технологических процессов, таких как обогащение, сепарирование, сушка и охлаждение транспортируемого продукта, аспирация технологического оборудования и т.д., что выгодно отличает его от механического транспорта. В связи с этим количество мельниц, работающих на пневмотранспорте из года в год в нашей стране резко возрастает.

К 1975 году количество предприятий, работающих на пневмотранспорте, возрастет до 440 ед., общей производительностью около 80 тыс. тонн в сутки. Однако обладая рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с механическим транспортом, пневматическому транспорту присущи также и недостатки, к которым прежде всего относятся повышенные скорости воздуха и транспортируемого материала, что приводит к дроблению продукта и, вследствие этого, невозможность применения пневмотранспорта на рисо- и гречезаводах, большая кратность воздухообмена в помещении, что имеет социаль-



ное значение, и повышенный расход энергии. Расход энергии на тонну сортовой муки при пневматическом транспорте составляет 80-85 квт/час по сравнению с 50-52 квт/часами при механическом.

Проблема снижения перечисленных недостатков пневматического транспорта в настоящее время является весьма актуальной, ибо это в отдельных случаях тормозит его применение. Так в частности на грече- и рисо заводах и в других отраслях промышленности повреждение зерна, в результате высоких скоростей транспортирования, снижает качество готовой продукции, ухудшает условия ее хранения. Поэтому целесообразно вести пневматическое транспортирование при малых скоростях воздуха. В настоящее время эти скорости значительно превосходят скорость витания; так, например, для зерна в 1,8 + 2,5 раза, а для муки в 7 + 10 раз.

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и выводов.

В первой главе реферируемой работы рассмотрены вопросы минимальных скоростей воздуха, дробления продукта и энергозатрат при пневмотранспорте в материалопроводах круглого поперечного сечения, а также указаны цель и задачи исследования.

Исследованию минимальной рабочей скорости воздуха в круглых материалопроводах уделено внимание в работах отечественных исследователей — Зуева Ф.Г., Пальцева В.С., Дмитрука Е.А., Забродского С.С., Платонова П.Н., Артеменко В.Т. и др. и зарубежных — Г.Зеглера, Г.Вальшофа, А.Зенца, Г.Отмера, В.Барта, И.Далла-Валле и др.

Результаты проведенных исследований часто противоречивы даже в узких пределах применимости расчетных формул для  $V_{min}$ .

Так, например, Г.Зеглер указывает на зависимость  $V_{min}$  от нагрузки и подчеркивает, что  $V_{min}$  не зависит от диаметра мате-



риалопровода, а Зуев Ф.Г. и В.Барт показали, что  $V_{min}$  зависит не только от нагрузки, но и диаметра материалопровода. У Вельшофа Г., Зенца А. и Г.Отмера приводится зависимость  $V_{min}$  от плотности потока, в то время, как Дмитрук Е.А. установил зависимость  $V_{min}$  только от  $V_s$  и указывает, что  $V_{min}$  не зависит от  $D$  и  $G$ . И.Далла-Валле приводит зависимость минимальной скорости от плотности и диаметра частиц транспортируемого материала, а R. Volchheim от  $V_s$  и скорости воздуха по оси материалопровода, т.е. от эпюры скоростей воздушного потока.

Платоновым П.Н. и Артеменко В.Т. в последнее время разработана специальная система автоматического регулирования оптимальной скорости воздуха в зависимости от производительности.

Таким образом, обобщая материал по проведенным исследованиям минимальной скорости воздуха при пневмотранспортировании зерна и зернопродуктов, следует сделать вывод об отсутствии среди исследователей единого мнения о влиянии на  $V_{min}$  основных параметров пневмотранспорта и существовании функциональной зависимости

$$V_{min} = f(L, V_s, \rho_m, d, D, G \text{ и т.д.}) \quad (I)$$

В процессе пневмотранспортирования частицы испытывают соударения и столкновения со стенками материалопровода, что приводит к дроблению частиц и износу материалопровода. Степень измельчения транспортируемого материала и износ материалопровода зависят от скорости движения частиц, которая пропорциональна скорости воздушного потока. Так в частности на грече- и рисо заводах дробление транспортируемого материала при существующих скоростях воздуха осуществляется на столько, что приводит к ухудшению качества готовой продукции.

Из теоретических предпосылок, намеченных в работах Броунштейна Б.И., Тодеса О.М., Ландау Л.Д., Лившица Е.М., явствует, что



с ростом средней скорости потока возрастает радиальная составляющая скорости, что должно приводить к дроблению транспортируемого материала и износу материалопровода. Это подтверждается экспериментальными исследованиями Разумова И.М. при пневмотранспортировании алюмосиликатного шарикового катализатора. Из исследований Разумова И.М., Боургуэта И.М., Древа Р. и др. следует, что для уменьшения истирания материалопровода и дробления транспортируемого материала следует создавать пневмоподъемники минимального диаметра с транспортированием при низких скоростях воздушного потока. Однако уменьшение диаметра материалопровода влечет за собой уменьшение производительности пневмоустановки, а снижение скорости воздуха - к прекращению пневмотранспортирования. Сближить стенки материалопровода, не изменяя поперечное сечение, можно применив, например, материалопровод кольцевого живого сечения, т.е. типа "труба в трубе", с транспортированием сыпучего материала по кольцу.

Энергозатраты вертикального пневмотранспорта, как показали исследования Г. Вельшофа, А.М. Дядзио, Г.Ф. Костюка, П.Н. Платонова, К.А. Резникова, О.М. Тодеса, В.А. Успенского, Я. Урбана и др. зависят также от скорости воздуха и скорости движения частиц. Чем меньше скорость воздуха, тем больше, при прочих равных условиях, к п д пневмотранспортирования, т.е. меньше затраты энергии на транспорт материала.

Исследования, проведенные в ОГИПП показывают, что на минимальную рабочую скорость воздуха при вертикальном пневмотранспорте большое влияние оказывает эюра скоростей. Чем более ровная по сечению материалопровода эюра скоростей, тем при меньшей средней скорости воздуха можно осуществить пневмотранспорт.

Обобщение материала первой главы показывает, что снижение скорости воздушного потока влечет за собой снижение дробления



транспортируемого материала, уменьшение износа материалов, уменьшение воздухообмена в здании, уменьшение размеров воздухоочистительных сооружений, а также снижение энергоемкости пневматического транспортирования. Таким образом исследования с целью снижения рабочих скоростей воздуха позволят в значительной степени уменьшить существующие недостатки пневмотранспорта и открыть путь для его дальнейшего внедрения на зерноперерабатывающих и других предприятиях.

На основании проведенного анализа намечены цели и задачи исследования:

1. Найти такую форму поперечного сечения материалопровода, которая создает более выравненную эпюру скоростей воздуха и обеспечит устойчивую работу пневмотранспорта на более низких абсолютных рабочих скоростях воздуха в сравнении с круглыми материалопроводами.

2. На основании имеющихся исследований гидродинамики вертикальных взвесенесущих потоков получить методику расчета таких пневмоустановок.

Во второй главе приведены теоретические предпосылки к изысканию формы поперечного сечения материалопровода для вертикального транспортирования. Круглая форма материалопровода не является лучшей для передачи энергии воздушного потока частицам транспортируемого материала, т.к. в таких материалопроводах происходит резкое изменение градиента скорости воздушного потока от стенки к оси материалопровода. При этом частицы, находящиеся у стен трубопровода испытывают значительно меньшую аэродинамическую силу, чем частицы находящиеся в центре поперечного сечения. Поэтому сред-



няя по сечению минимальная рабочая скорость воздуха должна обеспечить достаточную аэродинамическую силу для транспорта частиц, находящихся у стен. При большом градиенте скорости воздуха от стенки к оси материалопровода скорость в центре сечения, а следовательно и средняя по сечению скорость воздуха, должна быть больше, чем при выравненной эпюре.

Кольцевой материалопровод типа "труба в трубе" с этой точки зрения является более благоприятным. Аналитически это можно показать для случая ламинарного режима однородной жидкости.

Для круглого и кольцевого материалопроводов поверхности равной скорости, — соосные цилиндры. Но для круглого сечения изотакса наибольшей скорости ( $U_{max} = const$ ) вырождается в ось трубы, а для кольцевого — в цилиндр, радиус которого  $R$ , рис. I.

Коэффициент неравномерности скорости  $\alpha$  является одной из важнейших характеристик кинематики потока. Чем ближе  $\alpha$  к единице, тем равномернее эпюра скоростей по сечению трубы. Он представляет собой отношение максимальной скорости к средней, т.е.

$$\alpha = \frac{U_{max}}{U} \quad (2)$$

При ламинарном движении в трубе круглого сечения  $\alpha = 2$  и не зависит от радиуса сечения. В трубе кольцевого сечения для этого же режима нетрудно получить его значение в виде:

$$\alpha = \frac{(m^2 - 1) \ln \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} - (1093) \cdot 2 \ln m}{(m^2 + 1) \ln m - (m^2 - 1)} \quad (3)$$

где  $m = \frac{r_2}{r_1}$ , т.е. отношение радиусов внутренней и наружной труб. При  $m = 0,16 + 0,25$   $\alpha \approx 1,52$ , что значительно меньше, чем в круглой трубе при равенстве расходов и поперечных сечений труб, т.е. эпюра скоростей более выравнена.

Для турбулентного режима качественная сторона при сопостав-



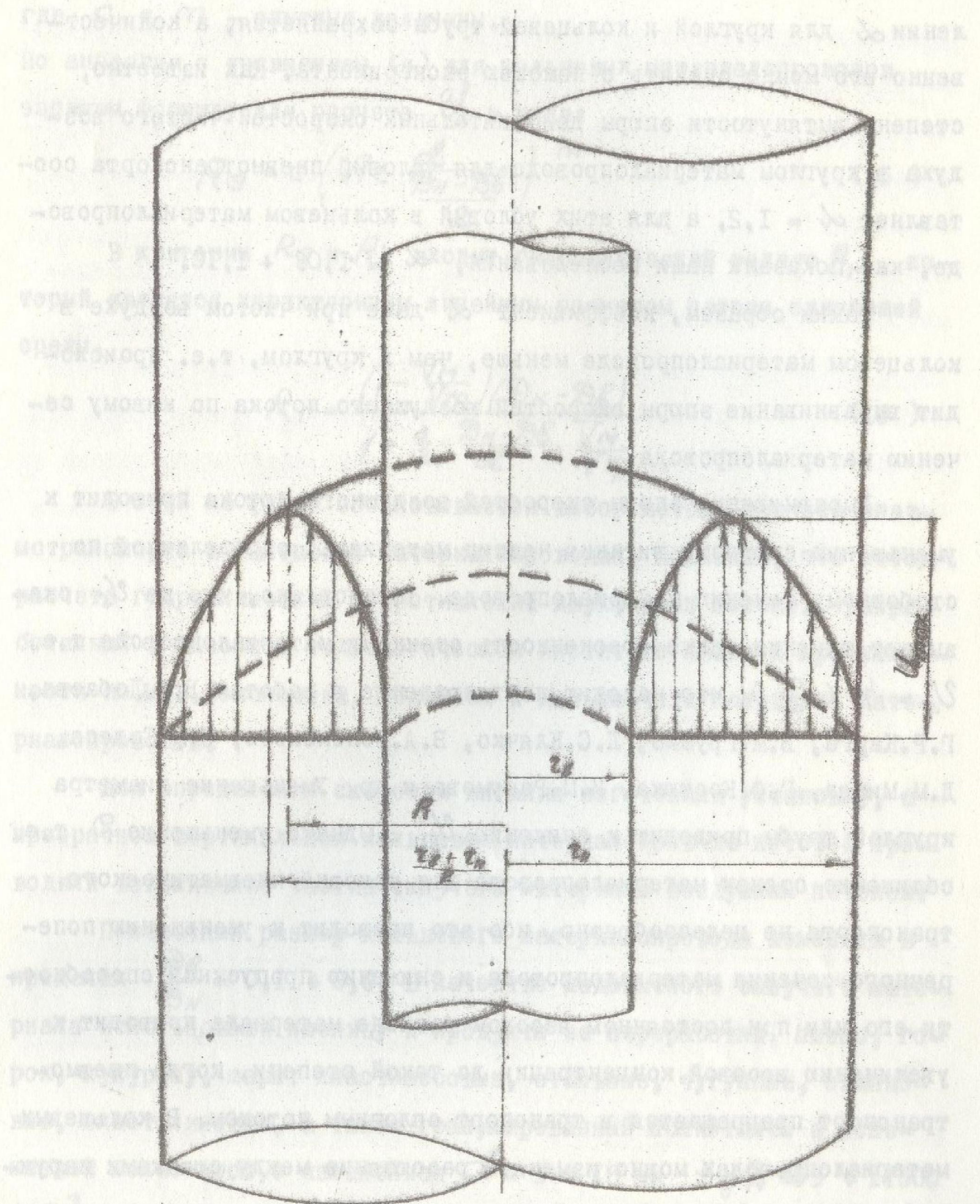


Рис. I.



лении  $\alpha$  для круглой и кольцевой трубы сохраняется, а количественно его можно оценить с помощью эксперимента. Как известно, степень вытянутости эпюры действительных скоростей чистого воздуха в круглом материалопроводе для условий пневмотранспорта составляет  $\alpha = 1,2$ , а для этих условий в кольцевом материалопроводе, как показали наши исследования,  $\alpha = 1,06 + 1,10$ .

Таким образом, коэффициент  $\alpha$  даже при чистом воздухе в кольцевом материалопроводе меньше, чем в круглом, т.е. происходит выравнивание эпюры скоростей воздушного потока по живому сечению материалопровода.

Выравнивание эпюры скоростей воздушного потока приводит к уменьшению скорости витания частиц материала, определяемой по свободному сечению материалопровода. Установлено, что на  $U_s$  оказывает влияние также стесненность стенками материалопровода т.е.  $U_s = \varphi \left( \frac{d}{D} \right)$ , что находит подтверждение в работах Б.Н.Лобаева, Г.Р.Карга, В.М.Грушко, Л.С.Клячко, В.А.Успенского, О.М.Тодеса, Д.М.Минца, Г.Ф.Костюка, И.М.Разумова и др. Уменьшение диаметра круглой трубы приводит к снижению  $U_s$ . Однако уменьшение  $D$  т.е. сближение стенок материалопровода для условий пневматического транспорта не целесообразно, ибо это приводит к уменьшению поперечного сечения материалопровода и снижению пропускной способности его или при постоянном весовом расходе материала приводит к увеличению весовой концентрации до такой степени, когда пневмотранспорт превращается в транспорт сплошным потоком. В кольцевых материалопроводах можно изменять расстояние между стенками наружной и внутренней труб, т.е. осуществлять стеснение стенками материалопровода, не изменяя поперечного сечения.

По исследованиям Г.Ф.Костюка скорость витания выражается зависимостью:

$$Re = c \left( \Delta z \frac{d}{D} \right)^m \quad (4)$$



где  $C$  и  $m$  - опытные величины,

По аналогии с уравнением (4) для кольцевых материалопроводов запишем формулу для расчета  $V_s$  в виде:

$$Re = C \left( A_2 \frac{d}{D_H - D_8} \right)^m \quad (5)$$

В критерии  $Re$  и  $A_2$  входит гидравлический радиус  $R_r$ , который является характерным линейным размером потока огибающей среды.

$$R_r = \frac{(1 - \frac{V_m}{V_{гр}}) / (D_H - D_8)}{1 + \frac{3}{2} \cdot \frac{D_H - D_8}{d} \cdot \frac{V_m}{V_{гр}}} \quad (6)$$

В этой же главе обосновывается выбор метода расчета пневмотранспорта в кольцевых материалопроводах. Показано, что метод расчета гидравлических сопротивлений двухфазных потоков, разработанный в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова, приемлем и для расчета кольцевых материалопроводов.

Для определения скорости витания изготовили установку, в прозрачном вертикальном кольцевом материалопроводе которой проводили взвешивание частиц сыпучего материала воздушным потоком.

Поперечный размер кольцевого материалопровода изменяли в пределах  $\frac{D_8}{D_H} = 0,1 + 0,6$ . В качестве подопытного сыпучего материала использовали пшеницу и продукты ее переработки, пшено, горох, кукурузу, шары: пластмассовые, стальные, чугунные, свинцовые, пластилиновые, а также гранулированный полиэтилен и вспененный полистирол, с изменением  $d = 1 + 18$  мм и  $\rho_s = 35 + 11600$  кг/м<sup>3</sup>.

Исследование пневматического транспортирования сыпучих материалов проведено на трех вертикальных пневмотранспортных установках при изменении высоты подъема от 5,5 до 15 метров, с



диаметром круглых материалопроводов от 75 до 130 мм, поперечными размерами кольцевых материалопроводов  $\frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{н}}} = 0,1 \pm 0,73$  по Транспортируемый материал в установках циркулировал замкнутому циклу: "приемник-материалопровод-отделитель-бункер-самотек-приемник".

В этой же главе приводятся методики определения основных параметров пневмотранспорта.

Минимально допустимые рабочие скорости воздуха при пневмотранспорте в вертикальных материалопроводах с приемниками ОТИ определяли путем плавного снижения скорости воздушного потока до скоростей, при которых происходит "подсор", а затем увеличивали скорость воздуха до ликвидации "подсора" и стабилизации показаний микроманометров у приемника.

Эпюры скоростей воздушного потока как для чистого воздуха, так и при пневмотранспорте сыпучих материалов определяли по живому сечению материалопровода по трем радиусам, расположенным под углом  $120^\circ$ .

В качестве транспортируемого материала применяли сыпучие материалы, характеристика которых приведена в таблице I.

Таблица I.

| Наименование материала     | $d$<br>мм | $\rho_{\text{н}}$<br>кг/м <sup>3</sup> | $v_{\text{с}}$<br>м/с |
|----------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------------------|
| Пшеница                    | 3,6       | 1340                                   | 10,8                  |
| Продукты I дранья          | 1,45      | 1340                                   | 6,0                   |
| Отруби                     | 0,35      | 1220                                   | 3,5                   |
| Мука                       | 0,2       | 1400                                   | 2,5                   |
| Опилки древесные           | 0,2       | 840                                    | 1,5                   |
| Фосфат                     | 0,35      | 3400                                   | 8,0                   |
| Шары пластмассовые         | 10,0      | 1160                                   | 15,0                  |
| Полиэтилен гранулированный | 3,6       | 998                                    | 8,2                   |
| Полистирол вспененный      | 5,5       | 40                                     | 3,0                   |



Выбор исследуемого материала определен диапазоном продуктов, применяемых на зерноперерабатывающих предприятиях. Кроме того, для проверки получаемых результатов и обобщенных зависимостей применяли материалы, имеющие значительное различие в физических, аэродинамических свойствах и геометрических размерах.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований.

Скорость витания в кольцевых материалопроводах описывается следующими уравнениями:

$$\text{при } 4000 < Re < 40\ 000 \quad Re = 0,115 \left( A_2 \frac{2d}{D_N - D_6} \right)^{0,6} \quad (7)$$

$$\text{при } 40\ 000 < Re < 80\ 000 \quad Re = 23 \cdot 10^3 + 10^{-5} A_2 \frac{2d}{D_N - D_6} \quad (8)$$

В кольцевых материалопроводах происходит снижение скорости витания по сравнению с круглыми материалопроводами эквивалентной площади поперечного сечения. Причем снижение  $U_c$  тем больше, чем больше диаметр частиц.

В этой же главе определяются поперечный размер внутренней трубы и минимально допустимая скорость пневматического транспортирования сыпучих материалов, приведенных в таблице I, при их транспорте в круглых и кольцевых материалопроводах. Установлено, что  $U_{min}$  в кольцевых материалопроводах снижается по сравнению с круглыми при равных площадях поперечных сечений и нагрузках.

На рис. 2 в качестве примера приведены результаты пневмотранспортирования продуктов I др., где показана зависимость  $U_{min}$  от  $G$  для различных соотношений  $\frac{D_6}{D_N}$ .

Обработка экспериментального материала в зависимости от отношения минимально допустимых рабочих скоростей воздуха кольцевого к круглому материалопроводу от  $\frac{D_6}{D_N}$  при различных  $G$  позволила установить оптимум кольцевой щели материалопровода.



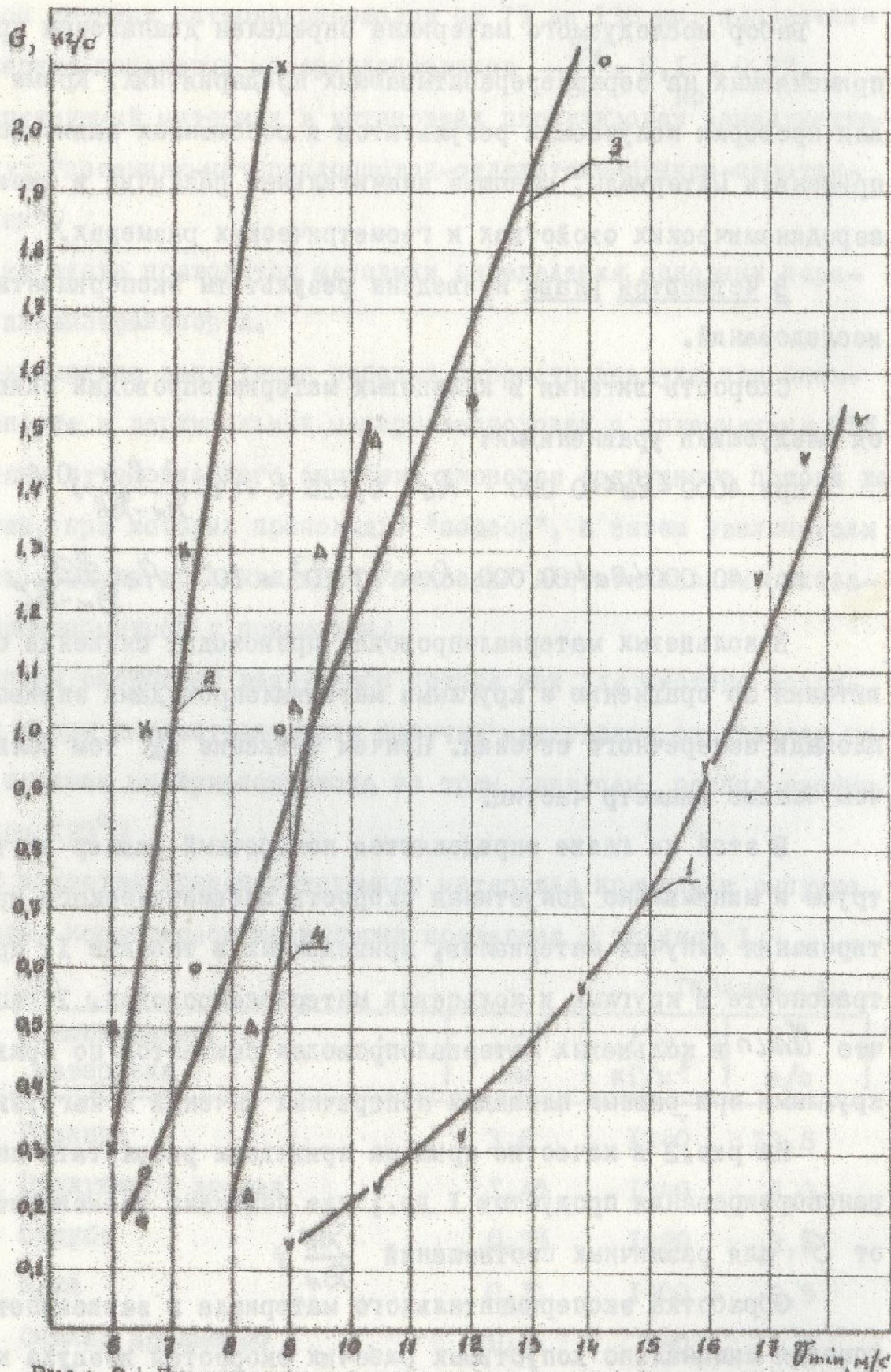


Рис. 2. Пневмотранспортирование продуктов первого дражья в круглом (I) и кольцевых материалопроводах при  $\frac{D_{ш}}{D_H}$  равном: 2 - 0,208; 3 - 0,17; 4 - 0,26.



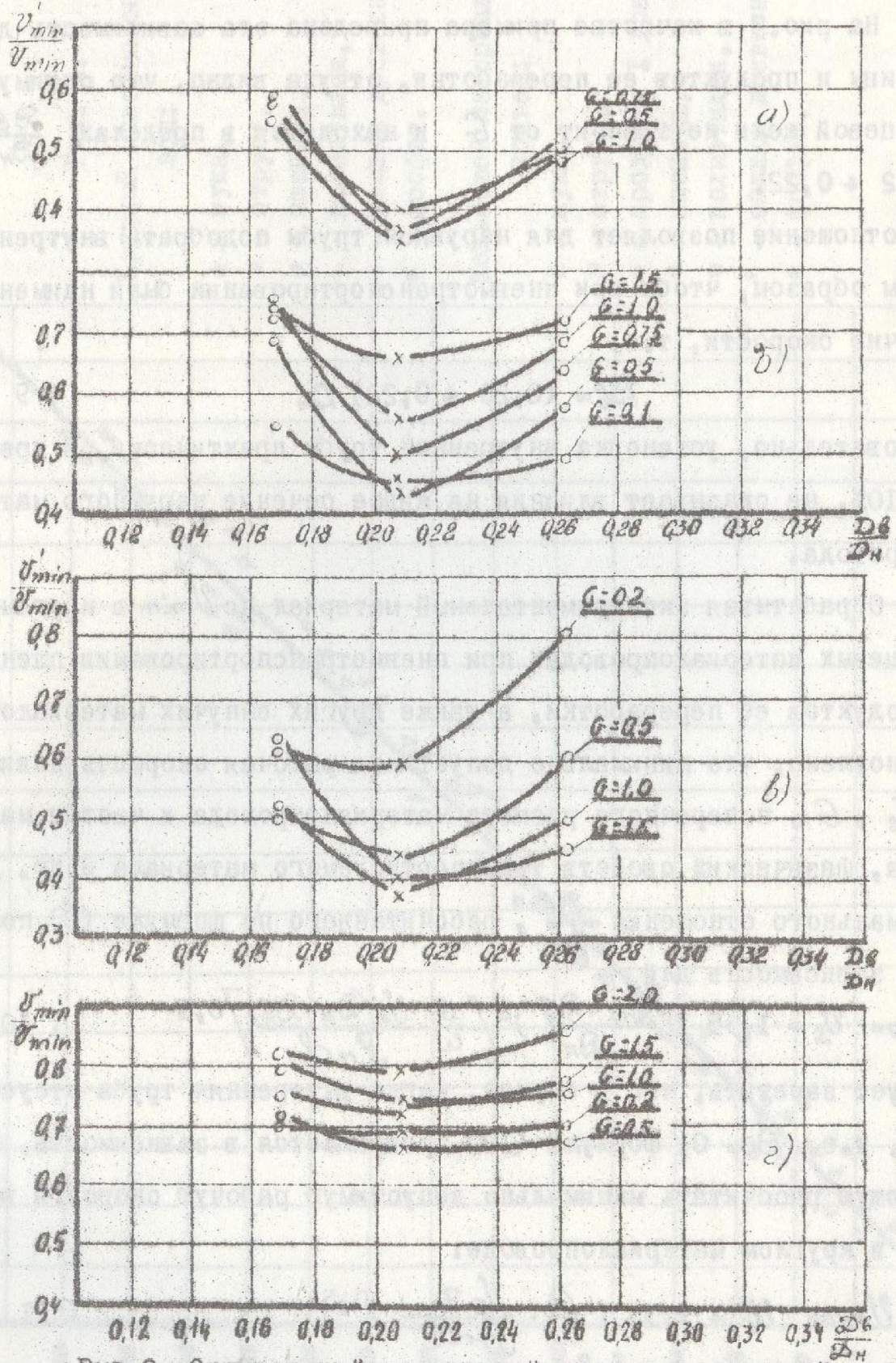


Рис. 3. Оптимальный поперечный размер внутренней трубы кольцевого материалопровода:

а) мука ; б) отруби ; в) продукты I др. ; г) пшеница.



На рис.3 в качестве примера приведена эта зависимость для пшеницы и продуктов ее переработки, откуда видно, что оптимум кольцевой щели не зависит от  $G$  и находится в пределах  $\frac{D_6}{D_H} = 0,2 + 0,22$ .

Это отношение позволяет для наружной трубы подобрать внутреннюю таким образом, чтобы при пневмотранспортировании были наименьшие рабочие скорости, т.е.

$$D_6 = (0,20 + 0,22) D_H \quad (9)$$

Следовательно, установка внутренней трубы практически, в пределах 10%, не оказывает влияния на живое сечение наружного материалопровода.

Обработывая экспериментальный материал по  $U_{min}$  в круглых и кольцевых материалопроводах при пневмотранспортировании пшеницы и продуктов её переработки, а также других сыпучих материалов, установлено, что минимально допустимая рабочая скорость зависит от  $U_s$ ,  $G$ , поперечного размера материалопровода и частиц материала, физических свойств транспортируемого материала и др. Для оптимального отношения  $\frac{D_6}{D_H}$ , рассчитанного по формуле (9) получена зависимость для

$$U_{min} = U_s + 1,35 \left( \frac{D_H - D_6}{D_H} \right)^2 \left[ \frac{G}{\omega} \cdot \frac{U_s (D_H - D_6)}{\rho_m d} \right]^{0,5} \quad (10)$$

Следует заметить, что в случае, когда внутренняя труба отсутствует, т.е.  $D_6 = 0$ , формула (10) превращается в зависимость, позволяющую рассчитать минимально допустимую рабочую скорость воздуха в круглом материалопроводе:

$$U_{min} = U_s + 1,35 \left( \frac{G}{\omega} \cdot \frac{U_s D}{\rho_m d} \right)^{0,5} \quad (11)$$

Справедливость формулы (10) проверена нами в интервале  $\frac{D_6}{D_H} = 0 + 0,3$ , который включает и оптимальный размер кольцевого материалопровода.



Одесский технологический институт пищевой промышленности  
 Библиотека  
 182281093

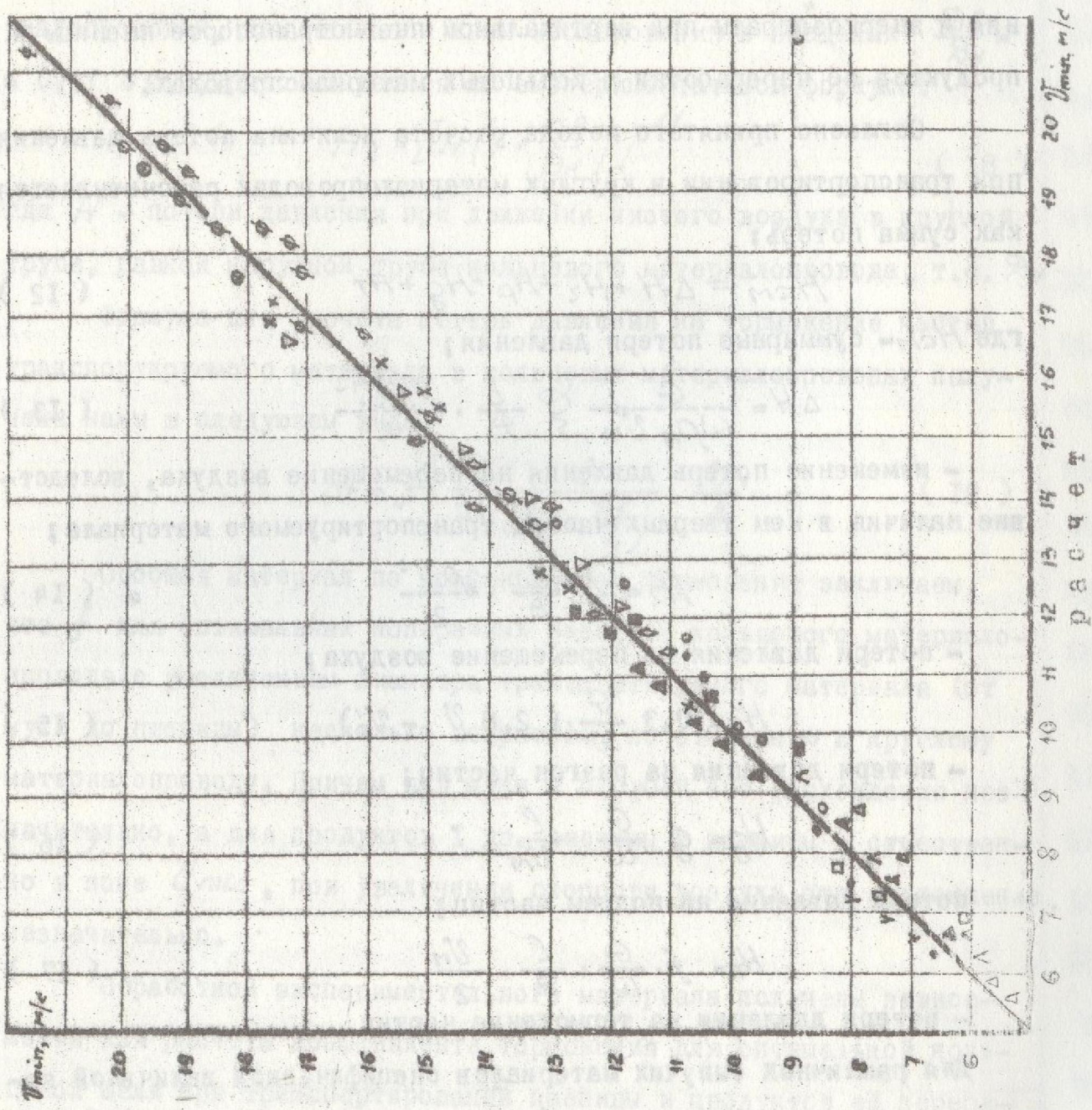


Рис. 4.



Соответствие  $V_{min}$ , рассчитанных по формулам (I0) и (II) действительным (экспериментальным) для различных сыпучих материалов, представлено на рис. 4. Как видно из рис. 4 справедливость формул для  $\frac{G}{\omega} = 10 + 230 \text{ кг/м}^2$  с находится в пределах 10%, что вполне соответствует исследованиям пневмотранспорта.

В этой же главе рассматриваются гидравлические сопротивления и энергозатраты при вертикальном пневмотранспорте пшеницы и продуктов её переработки в кольцевых материалопроводах.

Согласно принятого метода расчета величина потерь давления при транспортировании в круглых материалопроводах рассчитывается как сумма потерь:

$$H_{см} = \Delta H + H_2 + H_p + H_g + H_t \quad (I2)$$

где  $H_{см}$  — суммарные потери давления;

$$\Delta H = \frac{G}{\omega \rho_m V_m} \sum \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho (V_s')^2}{2} \quad (I3)$$

— изменение потерь давления на перемещение воздуха, вследствие наличия в нем твердых частиц транспортируемого материала;

$$H_2 = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (I4)$$

— потери давления на перемещение воздуха;

$$H_p = 0,3 \frac{G}{\omega} \cdot (2,8 V - V_s') \quad (I5)$$

— потери давления на разгон частиц;

$$H_g = g \frac{G}{\omega} \frac{L}{V_m} \quad (I6)$$

потери давления на подъем частиц;

$$H_t = f \cdot \frac{G}{\omega} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_m}{2} \quad (I7)$$

— потери давления на торможение частиц.

Для различных сыпучих материалов специфической величиной является коэффициент торможения  $f$ , который в настоящее время определяется экспериментально. Установлено, что существует вполне



определенная зависимость между  $f$  и отношением  $\frac{V_m}{V_s}$ . Расчет гидравлических сопротивлений при пневматическом транспортировании сыпучих материалов в кольцевых материалопроводах проводится аналогично (12), только в формулу для расчета  $\Delta H$  необходимо вместо  $D$  подставить эквивалентный диаметр кольцевого поперечного сечения материалопровода, а потери чистого воздуха в кольцевых материалопроводах, как показали наши исследования в пределах  $\frac{D_6}{D_H} = 0,17 \div 0,3$ , рассчитываются по экспериментальной формуле:

$$H_2 = [H(1 + \frac{D_6}{D_H})]^{1,1} \quad (18)$$

где  $H$  — потери давления при движении чистого воздуха в круглой трубе, равной наружной трубе кольцевого материалопровода, т.е.  $D_H$

Формула для расчета потерь давления на торможение частиц транспортируемого материала в кольцевых материалопроводах получена нами в следующем виде:

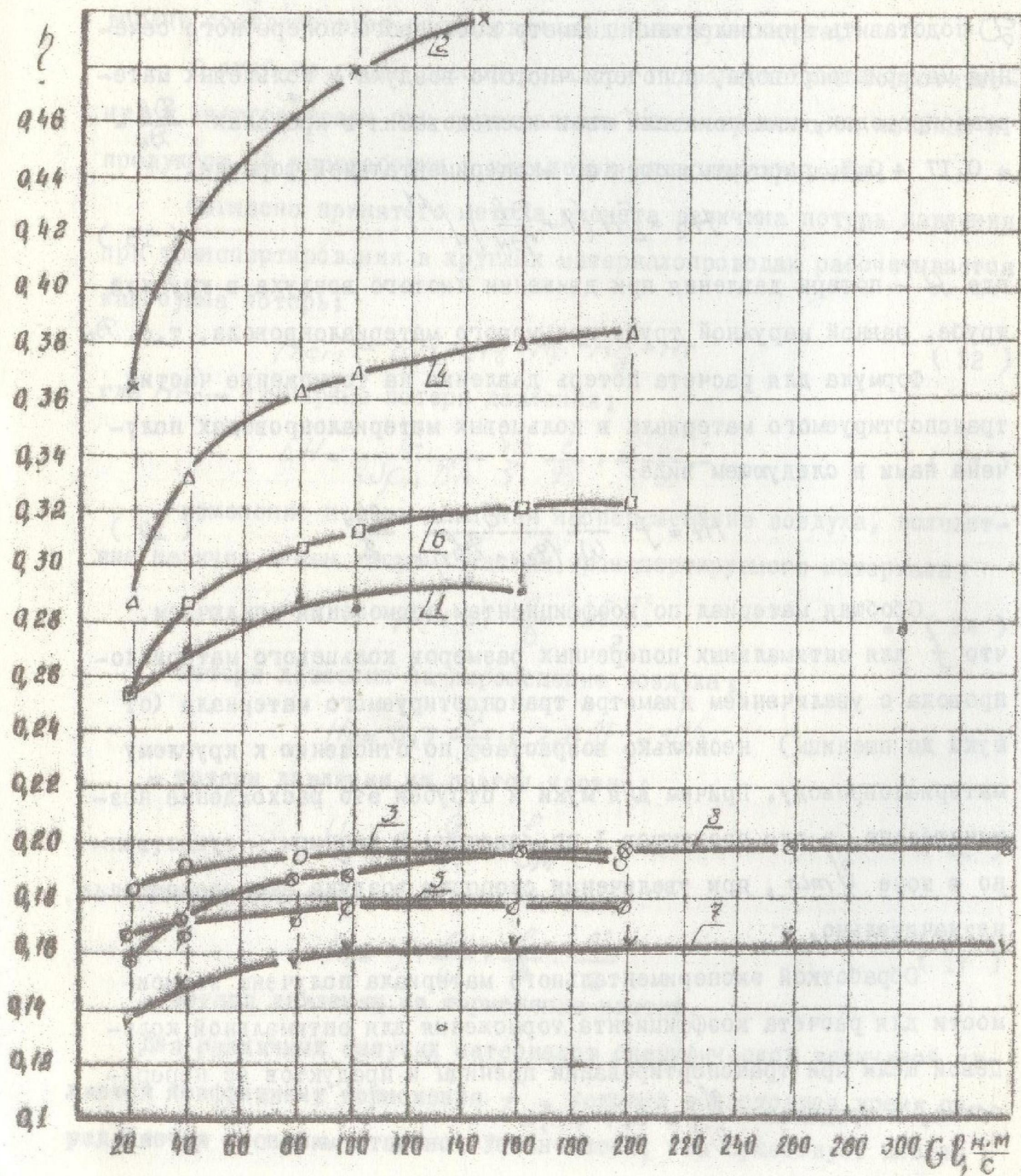
$$H_T = f \frac{G}{\omega} \frac{L}{(D_H - \frac{D_6}{2})} \frac{V_m}{2} \quad (19)$$

Обобщая материал по коэффициентам торможения заключаем, что  $f$  для оптимальных поперечных размеров кольцевого материалопровода с увеличением диаметра транспортируемого материала (от муки до пшеницы) несколько возрастает по отношению к круглому материалопроводу. Причем для муки и отрубей это расхождение незначительно, а для продуктов I др. системы и пшеницы — существенно в зоне  $V_{min}$ , при увеличении скорости воздуха это расхождение незначительно.

Обработкой экспериментального материала получены зависимости для расчета коэффициента торможения для оптимальной кольцевой щели при транспортировании пшеницы и продуктов её переработки, в пределах  $\frac{V_m}{V_s} = 0,4 \div 0,8$



Рис. 5. Зависимость  $\zeta$  от полезной мощности пневматического транспортирования в круглом (1,3,7,5) и кольцевом (2,4,6,6) материалах, соответственно: муки, отрубей, пшеницы, продуктов I дранья.





а) пшеница:

$$f = 0,024 - 0,020 \ln \frac{V_M}{V_S} + 0,0035 \frac{V_M}{V_S} \quad (20)$$

б) продукты первой драной системы:

$$f = 0,026 - 0,020 \ln \frac{V_M}{V_S} + 0,0031 \frac{V_M}{V_S} \quad (21)$$

в) мука и отруби:

$$f = 0,042 - 0,035 \ln \frac{V_M}{V_S} + 0,0049 \frac{V_M}{V_S} \quad (22)$$

Энергозатраты пневматического транспортирования можно характеризовать коэффициентом полезного действия:

$$\eta = \frac{G \ell}{V_{min} W_{ном}} \quad (23)$$

Сопоставление энергозатрат пневматического транспортирования пшеницы и продуктов её переработки в кольцевом материалоприводе при оптимальных размерах  $\frac{D_6}{D_n}$  с круглыми приведено на рис. 5 для равных площадей поперечного сечения и при  $V_{min}$ .

Из рис. 5 видно, что  $\eta$  п д пневмотранспортирования в кольцевых материалопроводах всегда выше, чем в круглых. Это подтверждает, что энергия воздушного потока в кольцевых материалопроводах используется рациональнее, чем в круглых, т.е. кольцевые материалопроводы аэродинамически совершеннее круглых.

Снижение минимально допустимых рабочих скоростей воздуха в кольцевых материалопроводах позволяет сократить габариты разгрузителей, пылеотделителей, вентиляторов, т.е. основного пневмотранспортного оборудования.

В пятой главе приведены результаты аэродинамических испытаний приемника, предназначенного для аспирации технологического оборудования размольных отделений мельниц, базирующего на основе приемника ОТИ. Показано, что при этом происходит снижение  $V_{min}$  и энергозатрат в кольцевых материалопроводах с таким



приемником в сравнении с приемником типа "сопло".

В шестой главе приведена методика расчета вертикального пневмотранспорта в кольцевых материалопроводах при пневмотранспорте зерна и зернопродуктов, а также других сыпучих материалов.

Расчет гидравлических сопротивлений в кольцевых материалопроводах с оптимальным отношением  $\frac{D_6}{D_H}$  проводится согласно метода, разработанного в ОТИПП им.М.В.Ломоносова по формуле (12), только  $H_2$  рассчитывается по формуле (18),  $H_T$  - по формуле (19),  $U_{mil}$  - по формуле (10), а коэффициенты торможения для пшеницы и продуктов её переработки по формулам (20) - (22).

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Применение кольцевого поперечного сечения на начальном участке вертикального материалопровода снижает абсолютную величину минимальной рабочей скорости воздуха при пневмотранспорте сыпучих материалов. Причиной этому является в основном более выравненная эпюра скоростей воздуха, в сравнении с материалопроводом круглого поперечного сечения, и уменьшение скорости витания частиц за счет условий стеснения стенками трубопровода.

2. Приведены расчетные формулы для определения оптимальных размеров внутреннего трубопровода по отношению к наружному.

3. Получены уравнения, позволяющие рассчитать гидравлические сопротивления при пневмотранспорте сыпучих материалов в материалопроводах кольцевого поперечного сечения.

4. Показана применимость метода ОТИПП для расчета пневмотранспорта в кольцевых материалопроводах.



5. Экспериментально доказано, что применение материалопроводов кольцевого сечения повышает к п д пневмотранспортирования и тем больше, чем меньше размер транспортируемых частиц.

6. Модернизация приемника ОТИ применительно к материалопроводам с кольцевым поперечным сечением, обеспечивает в случае необходимости одновременную аспирацию технологического оборудования.

7. Получены расчетные формулы для определения скоростей свободного и стесненного витания сыпучего материала в кольцевых каналах.

#### РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Результаты работы могут быть применены при проектировании вертикального пневмотранспорта на зерноперерабатывающих и других предприятиях, с целью снижения рабочих скоростей воздуха и снижения энергозатрат.

2. Вследствие того, что кольцевые материалопроводы при одинаковой скорости воздуха обеспечивают большую нагрузку чем круглые, то их можно применять в существующих пневмотранспортных установках с целью увеличения нагрузки.



### Основные обозначения

$\varnothing$  - диаметр трубопровода, м

$\varnothing_{\text{вн}}$  - внутренний диаметр наружного трубопровода, м

$\varnothing_{\text{вн}}$  - наружный диаметр внутреннего трубопровода, м

$G$  - массовый расход материала, (производительность) кг/с

$R_r$  - гидравлический радиус, м

$V_m$  - объем материала, м<sup>3</sup>

$V_r$  - объем трубопровода, м<sup>3</sup>

$H_z$  - потери давления при движении воздуха в свободном сечении трубопровода, Па

$\Delta H$  - изменение потерь давления жидкой среды, вследствие наличия в трубопроводе твердых частиц, Па

$H_{\text{см}}$  - 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, м<sup>3</sup>/с

$v$  - средняя по сечению трубопровода скорость жидкой среды, м/с

$v_{\text{мин}}$  - минимальная надежно транспортирующая скорость воздуха, м/с

$v_m$  - скорость движения материала, м/с

$v_s$  - скорость свободного витания, м/с

$v'_s$  - скорость стесненного витания, м/с

$d$  - размер частиц, м

$l$  - длина трубопровода, м

$g$  - ускорение свободно падающего тела, м/с<sup>2</sup>



$f$  - коэффициент торможения

$\gamma_m$  - удельный вес материала,  $\text{кг/м}^3$

$\omega$  - площадь поперечного сечения трубопровода,  $\text{м}^2$

$\rho$  - плотность жидкой среды,  $\text{кг/м}^3$

$\rho_m$  - плотность материала,  $\text{кг/м}^3$

$\lambda, \lambda_m, \lambda_{cm}$  - коэффициенты сопротивления по длине трубопровода

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,  $\text{м}^2/\text{с}$

$\xi$  - коэффициент сопротивления

$M = \frac{G}{\omega \nu \rho}$  - коэффициент массовой концентрации - отношение массового расхода частиц к массовому расходу охлаждающей среды

$\zeta$  - к п д пневмотранспортирования

$Re$  - критерий Рейнольдса

$Ar$  - критерий Архимеда



По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Определение скорости витания сыпучих материалов в кольцевых материалопроводах. Известия вузов "Нефть и газ", №11, 1971.
2. Применение кольцевых материалопроводов для вертикального пневмотранспорта. Известия вузов "Пищевая технология", №3, 1972.
3. Вертикальный пневмотранспорт древесных опилок. Реф. сб. "Гидролизное производство", №1, 1973.
4. Снижение рабочих скоростей воздуха в кольцевых материалопроводах. Известия вузов "Пищевая технология", №4, 1973.
5. Вертикальный пневмотранспорт фосфата. Материалы конференции "Трубопроводный транспорт" Курск, 1972.
6. Расчет плотности укладки сыпучих материалов в кольцевых материалопроводах. Материалы конференции "Трубопроводный транспорт", Курск, 1972.
7. Поперечные размеры кольцевого материалопровода при вертикальном пневмотранспорте. Реф. сб. "Гидролизное производство", №9, 1973.

Основные результаты диссертационной работы докладывались:

1. На научных конференциях ОТИП им.М.В.Ломоносова с 1970 по 1973 годы (пять докладов).
2. На конференции "Трубопроводный транспорт", Курск, ноябрь, 1972 (два доклада).