

Автореф.
М 14

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Инженер Б. М. МАКСИМЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗЕРНОПРОДУКТОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ

Автореферат диссертационной работы
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор А. М. Дзядзио
Кандидат технических наук В. С. Пальцев

Одесса, 1965

ск

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

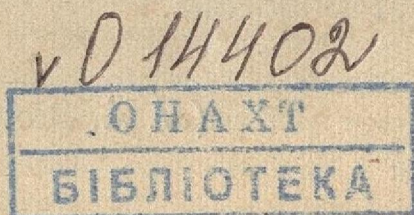
На правах рукописи

Инженер Б. М. МАКСИМЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ ЗЕРНОПРОДУКТОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ПНЕВМОТРАНСПОРТЕ

Автореферат диссертационной работы
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:
доктор технических наук, профессор А. М. Дзядзио
Кандидат технических наук В. С. Пальцев



Одесса, 1965

ОНАХТ
11.07.12
Исследование скорост



v014402

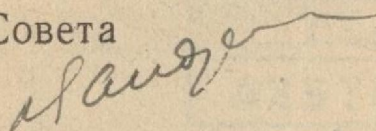
Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам автореферат диссертации инженера Максимчука Б. М. «Исследование скорости движения зернопродуктов при вертикальном пневмотранспорте», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Экспериментальная работа выполнена в лаборатории аспирации и пневмотранспорта Всесоюзного научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки в г. Москве.

Защита диссертации назначена на « 4 » нояб 1965 г.

Ваш отзыв и замечания в двух экземплярах просим направить по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, 112, Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

 (Л. А. Запорожец).

Программой КПСС предусмотрено повышение уровня механизации производственных процессов, значительное влияние уделено вопросам комплексной механизации и автоматизации трудоемких процессов и совершенствованию всех видов транспорта.

Внутрицеховой пневматический транспорт все более широко применяется на зерноперерабатывающих предприятиях СССР. В 1965 г. осуществляется строительство оборудованных внутрицеховым пневмотранспортом мельничных предприятий, производительностью 3260 т зерна в сутки и комбикормовых предприятий, производительностью 3395 т комбикормов в сутки. Народнохозяйственным планом развития мукомольной промышленности на 1970 г. намечено удвоить, по сравнению с 1963 г. суммарную производительность мельниц, оборудованных пневмотранспортом.

Пневмотранспорт на зерноперерабатывающих предприятиях оказывает положительное влияние на ведение технологического процесса, улучшает условия труда, позволяет высвободить производственные площади, но, вместе с тем, имеет существенный недостаток—высокую энергоемкость. Одной из главных причин высокого расхода энергии пневмотранспортными установками является избыток расхода воздуха и самопроизвольное его перераспределение в параллельных материалах. Данные многочисленных обследований мельниц, показывают, что устранение избыточного расхода воздуха обусловит снижение энергоемкости мельничных пневмоустановок на 15—25%, что составит 45—70 млн. квч.

Однако, реальная экономия от этого мероприятия возможна лишь в случае создания автоматических регулирующих устройств и уточнения закономерностей процесса пневмотранспорта.

Без данных о местной и средней скорости частиц зернопродуктов невозможна правильная оценка энергоемкости и определение величины потери давления при пневмотранспорте,

выявление оптимальных режимов равно как и вычисление времени нахождения продукта в материалопроводе. Эти сведения дадут возможность осуществить более экономичное и широкое использование пневмотранспорта, например на зернообрабатывающих предприятиях в технологических целях: для сушки, охлаждения, кондиционирования.

В свете изложенного, настоящее исследование, посвященное изучению местных и средних скоростей частиц зернопродуктов в вертикальных материалопроводах пневмоустановок, — представляется полезным и актуальным.

В первой главе освещено современное состояние вопроса о скорости частиц при пневмотранспортировании. Рассмотрение работ, содержащих сведения о скорости движения частиц при пневмотранспорте, свидетельствует о значительных расхождениях во мнениях авторов. Число работ, относящихся непосредственно к пневмотранспортированию зернопродуктов, невелико. Несмотря на тщательно выполненные экспериментальные исследования Дзядзио А. М., Пальцева В. С., Кеммера А. С., Жихарева Е. А., Смолдырева А. Е. до настоящего времени нет единого математического выражения для скорости частиц транспортируемого материала.

Большинство авторов, на основании теоретических предположений (Козьмин П. С., Страхович К. И., Броунштейн Б. М., Тодес О. М., Горбис З. Р.) при рассмотрении вопроса о вертикальном пневмотранспортировании сыпучих материалов установили математические зависимости с рядом значительных допущений, не учитывающих реальных условий пневмотранспортирования (изменения скорости воздуха по сечению и длине трубопровода, соударения частиц). Многие исследователи (Гостерштадт И., Зеглер Г., Смолдырев А. Е., Дзядзио А. М., Жихарев Е. А., Сегаль И. С., Калинушкин М. Л., Карпов А. И., Зуев Р. Г., Циборовский и др.) считают, что при вертикальном пневмотранспортировании между скоростью воздушного потока и скоростью материала существует вполне определенная зависимость:

$$v_m = v - v_{\text{вит}} \quad (1)$$

Однако, некоторые из них (Барт В., Горбис З. Р., Шейман В. А., Каспер В. И., Гаспарян А. М., Хичкок И., Джоянс К., Хинкль и др.) придерживаются мнения, что скорость движения частиц при пневмотранспорте выражается более сложной зависимостью.

Выводы из работ авторов (Лобаева Б. П., Успенского В. А., Разумова И. М., Калгена, Хариды, Молстеда и др.)

носят эмпирический характер, в значительной мере противоречивы и недостаточно убедительны. Это явилось, по-видимому, следствием недостаточно четкой методики проведения экспериментов, а также результатом многочисленных упрощений в подходе к столь сложному и быстротечному процессу, каким является пневмотранспорт. Кроме того, в большинстве исследований эксперименты по определению скорости частиц проводили на одном коротком и произвольно выбранном участке материалопровода, а полученные результаты необоснованно распространяли на весь участок пневмотранспортирования.

Во второй главе рассмотрен вопрос о математическом выражении скорости движения частиц зернопродуктов в вертикальных материалопроводах, на основе выполненных рядом авторов исследований и установленных при этом функциональных зависимостей.

Представленная в настоящем исследовании схема пневмотранспортирования несколько отличается от общепринятых, в которых этот процесс расчленяется на два самостоятельных участка: разгона и следующего за ним установившегося равномерного движения. Однако, в действительности, скорость воздушного потока неодинакова по сечению трубопровода и по его длине (вследствие изменения давления). Поэтому скорость транспортируемого материала представляется возможным выразить, как процесс непрерывного разгона массы M , приложенной к ней равнодействующей сил P .

Исходя из теоремы о количестве движения, в дифференциальной форме:

$$Mdv_m = Pdt \quad (2)$$

массу частиц M можно представить, как функцию весового расхода G_m в материалопроводе, время — как функцию пути l и скорости частиц v_m ; P — как равнодействующую силы тяжести g и силы аэродинамического сопротивления R .

Так как R зависит от коэффициента лобового сопротивления C_T в стесненных стенками трубы D условиях, размера частиц d_s и относительной скорости

$$v_0 = v - v_m \quad (3)$$

$$\text{то} \quad R = f[C_T, d_s, (v - v_m)] \quad (4)$$

Так как

$$C_T = f\left(Ar, Re_{\text{вит}}, \frac{d_s}{D}\right) \quad (5)$$

где: критерий Архимеда

$$Ar = \frac{4}{3} \cdot \frac{\rho_M - \rho}{\rho_M} \cdot \frac{g d_{\text{э}}^3}{\nu^2} \quad (6)$$

критерий Рейнольдса по витанию

$$Re_{\text{вит}} = \frac{v_{\text{вит}} \cdot d_{\text{э}}}{\nu} \quad (7)$$

То

$$R = \left[Ar, Re_{\text{вит}}, \frac{d_{\text{э}}}{D}, d_{\text{э}}, (v - v_M) \right] \quad (8)$$

Основываясь на уравнениях (4) и (8) и выводах из исследований Дзядзио А. М., Кеммера А. С., Смолдырева А. Е., Горбиса З. Р., Барта В, Броунштейна Б. М., Тодеса О. М. и др. можно предположить, что при вертикальном пневмотранспортировании частиц материала имеет место следующая обобщенная функциональная зависимость:

$$v_M = f(D, v, \rho, \rho_M, d_{\text{э}}, v_{\text{вит}}, \nu, G_M, l) \quad (9)$$

Согласно второй теореме подобия, приняв в качестве переменных с независимыми размерностями: диаметр трубопровода D , скорость воздуха v и его плотность ρ , общее функциональное уравнение (9) можно преобразовать в критериальное, которое, путем ряда преобразований методами теории подобия и размерностей, можно представить в виде:

$$\frac{v_M}{v} = \varphi \left(\frac{\rho_M}{\rho}, \frac{d_{\text{э}}}{D}, \frac{v_{\text{вит}}}{v}, \frac{l}{D}, \frac{1}{Re}, \frac{\mu}{Fr} \right) \quad (10)$$

где: критерий Фруда

$$Fr = \frac{v^2}{gD} \quad (11)$$

Полученное уравнение (10) отражает в наиболее обобщенной форме закон подобия, применительно к явлению движения материала в вертикальном материалопроводе, в зависимости от соотношения факторов, влияющих на скорость движения материала. Оно позволило наметить пути рационального проведения экспериментов и обработки опытных данных.

Практически, изменениями вязкости (ν) в пределах давлений, действующих при пневмотранспорте и пневмосепарации, а также колебаниями температуры можно пренебречь. Диаметр трубопровода (D) входит в другие критерии, скорость витания ($v_{\text{вит}}$) в известной мере определяется размером час-

тиц, а плотность материала (ρ_m) в опытах была постоянной (зерно и продукты его размола). Поэтому, с целью сокращения числа переменных, отношения: $\frac{\rho_m}{\rho}$, $\frac{d_{\Sigma}}{D}$, $\frac{1}{Re}$ из общего критериального уравнения (10) были исключены и в качестве исходного уравнения для настоящего исследования принято более простое:

$$\frac{v_m}{v} = F\left(\frac{v_{\text{внт}}}{v}, \frac{l}{D}, \frac{\mu}{Fr}\right) \quad (12)$$

В третьей главе приведено описание различных методов измерения скорости частиц, применяемых при вертикальном пневмотранспортировании. Наиболее распространенным из них является метод кино-фото съемки, использованный в исследованиях Гастерштадта (1922), Дзядзио А. М. (1956), Зуева Ф. Г. (1959), Зеглера Г. (1934), Смолдырева А. Е. (1957), Корна А. М. (1962).

В исследованиях Кремпа и Пристли (1924), Успенского В. А. (1955), Пальцева В. С. (1957), Дзядзио А. М. (1956), Зеглера Г. (1934), Шеймана В. А. и Каспера В. И. (1962) применен групповой метод с использованием отсечных задвижек или кранов.

Универсальным и более совершенным следует считать радиометрический метод с применением меченых радиоактивным изотопом частиц, использованный в исследованиях Карпова А. И. (1959), Смолдырева А. Е. (1959), Жихарева Е. А. (1960).

Метод измерения скорости частиц с токопроводящей поверхностью, примененный Сильвером Э. М., а также метод измерения кинетической энергии потока аэросмеси, (Барт В.) имеют меньшее распространение и обладают существенными недостатками.

Анализ методов определения скорости частиц зернопродуктов при пневмотранспортировании позволил, ввиду ряда преимуществ перед другими, избрать для настоящего исследования два из них: радиометрический и групповой.

Радиометрический метод обладает высокой чувствительностью, незначительной инерционностью и позволяет точно фиксировать местонахождение определенной меченой частицы без какого бы то ни было возмущения потока аэросмеси.

Групповой метод позволяет определить скорость полидисперсной аэросмеси на отдельных участках материалопровода, хотя это и требует прекращения процесса пневмотранспортирования в период замеров.

В четвертой главе описана методика исследования. Для проведения экспериментов по изучению скорости частиц в трубопроводе создали стендовую установку, которая состояла из вертикального материалопровода, высотой 18,5 м, центробежного разгрузителя, всасывающего высоковакуумного фильтра, воздуходувной машины при давлении 3000 кг/м², системы самотечных трубопроводов, весового устройства, бункеров для продукта и вибротолкового питателя.

Взаиморасположение оборудования позволяло осуществлять циркуляцию продукта по замкнутой схеме. В качестве контрольно-измерительной аппаратуры использовали: водяной батарейный манометр на 20 точек с пределом измерения до 2200 кг/м², насадок Вентури, протарированный по коллектору, пневмометрические трубки, незабивающиеся насадки ВНИИЗ для отбора импульсов полного и статического давления, микроманометры ЦАГИ и Аскания, осциллограф Н-700, радиометрическую установку УСИД-12, самопишущие приборы ДС-1-03, дифференциальные манометры ДМ, электросекундомеры.

При пневмотранспортировании зернопродуктов в материалопроводе диаметром 52,5 мм производительность установки поддерживали на уровне $G_m = 0,5$ и 1,0 т/час, а в материалопроводе диаметром 100 мм — $G_m = 1,0; 2,0; 4,0$ и 6,0 т/час. Скорость воздуха при этом составляла 15; 20; 25; 30 и 35 м/сек. Кроме того, при радиометрическом методе измерений исследовали процесс пневмотранспортирования одной меченой частицы $G_m = 0$ т/час.

Экспериментальная установка для определения скорости частиц зернопродуктов групповым методом позволяла осуществлять замеры в 14-ти последовательно расположенных участках (отсеках) на всей протяженности вертикального материалопровода высотой 18,5 м. Для этой цели на материалопроводе установили 14 отсечных задвижек, привод которых осуществили единой тягой от электромагнита.

Исследование скорости частиц радиометрическим методом при вертикальном пневмотранспорте было проведено на зерне пшеницы с использованием выше описанной установки.

Определение скорости меченой частицы проводили в 13 точках по высоте материалопровода, с помощью счетчиков СТС-6, установленных попарно в стальных коллиматорах. Импульсы от счетчиков поступали в установку УСИД-12, соединенную с многошлейфовым осциллографом Н-700, оборудованным автоматическим устройством включения и выключения лентопротяжного механизма при попадании частицы — индикатора в зо-

ну пневмотранспортирования. Дополнительный контроль за перемещением меченой частицы по самотечным трубопроводам и емкостям с продуктом осуществляли при помощи переносного дозиметрического прибора.

Опыты по измерению скорости частиц проводили в 7—8 повторностях, отметчик времени работал на частоте 200 гц.

Участок осциллограммы скорости движения зерна пшеницы в вертикальном материалопроводе, диаметром 100 мм, при производительности $G_m = 2,0$ т/час и скорости воздушного потока $v = 25$ м/сек, приведен на рис. 1. Вертикальные линии являются отметками времени, с интервалами в 0,05 сек.

В ходе экспериментов проводили следующие аэрометрические замеры.

Измеряли расход воздуха в материалопроводе при помощи насадка Вентури, протарированного по коллектору, геометрические размеры которого выполнены в соответствии с рекомендациями ЦАГИ.

Тарировочные кривые насадка Вентури были составлены с учетом изменения объема воздуха, происходящего вследствие перепада давления между началом и концом материалопровода. Отбор импульсов статического и общего давления проводили с помощью незабывающихся насадков ВНИИЗ, протарированных по образцовой пневмометрической трубке. Штуцеры для отбора импульсов статического давления были установлены попарно, по двум взаимноперпендикулярным диаметрам, вблизи коллиматоров со счетчиками СТС-6.

Измерение с непрерывной записью скоростного давления в материалопроводе, при транспортировании продукта и без него, проводили с помощью специально созданной установки, состоящей из незабывающихся насадков ВНИИЗ, исполнительного моторного механизма ПР-1, дифференциального манометра ДМ и самопишущего прибора ДС-1-03.

Скорость витания исследуемых продуктов $v_{\text{вит}}$ определяли на специальной установке, состоящей из коллектора, вертикального трубопровода из органического стекла, осадочной камеры и вентилятора.

На этой же установке определяли необходимые размеры пластмассового контейнера, в котором был помещен радиоактивный изотоп Co^{60} активностью 0,25 милликюри. По общепринятой методике определяли эквивалентный диаметр пшеницы и меченой частицы.

С целью выявления устройства, обеспечивающего наиболее равномерную подачу продукта в пневмоприемник и тем самым смягчающего пульсацию процесса, провели сравнительные ис-

Осциллограмма скорости зерна v_m
 ($D = 100$ мм, $v = 25$ м/сек. $G = 2$ т/час)

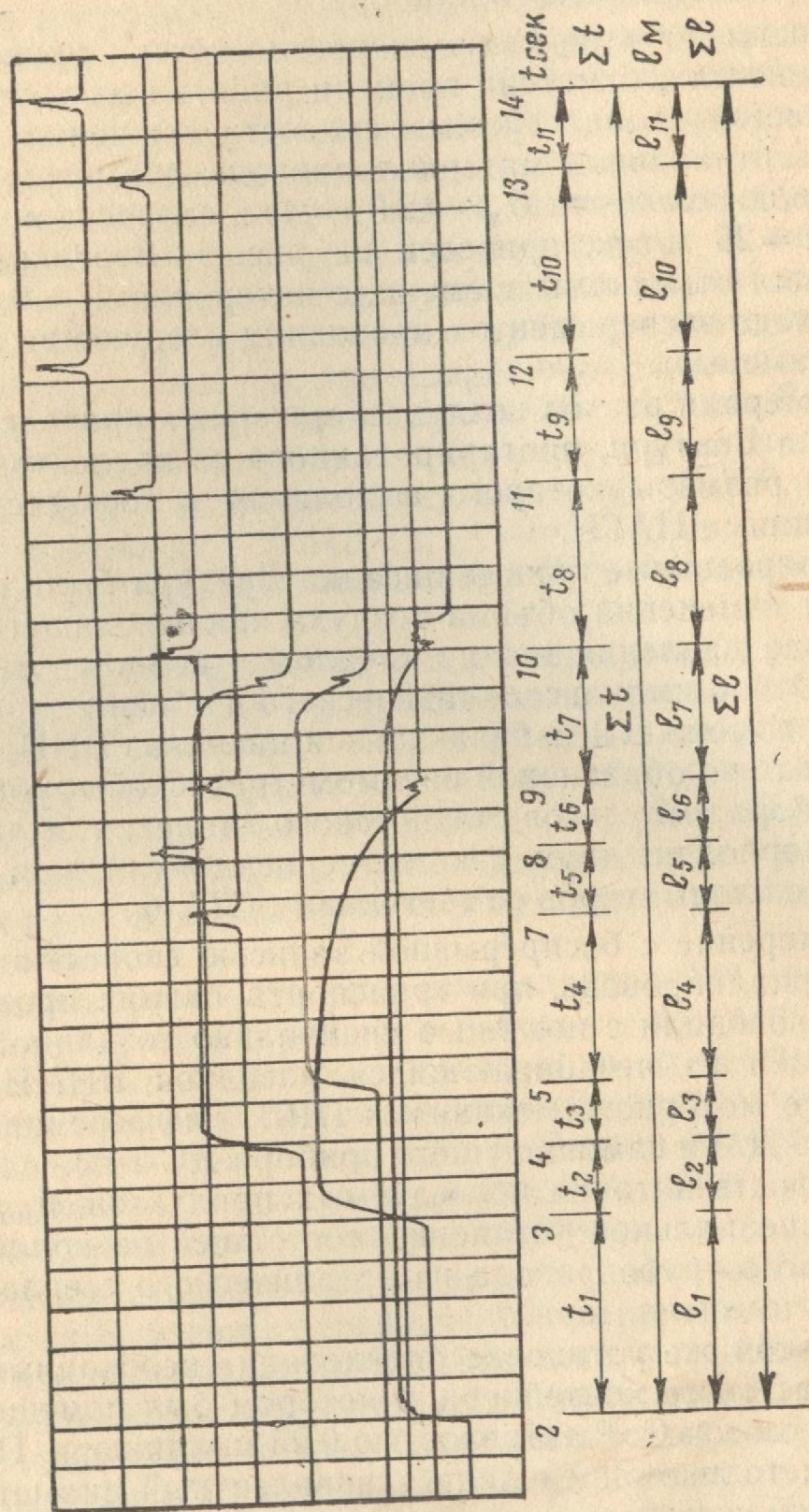


Рис. 1

питание шлюзового затвора, валкового и вибрлоткового питателей.

В результате обработки записи диаграмм пульсации давления, полученных при помощи самопишущих приборов вблизи места поступления продукта в материалопровод, установили, что наиболее равномерная подача продукта обеспечивалась в случае использования питателя вибрлоткового типа, который на этом основании включили в экспериментальную установку и применяли во всех сериях опытов.

Для проверки работоспособности и надежности конструкции отсечных задвижек, определения скорости закрывания сечения материалопровода и испытания механизма привода задвижек был создан лабораторный стенд.

Подбор минимального количества радиоактивного изотопа Co^{60} , обеспечивающего надежное включение контрольно-измерительной аппаратуры, проверка работоспособности электронных приборов после внесения в их схему некоторых изменений, а также наладка взаимодействия групп приборов и выявление точности радиометрического метода в диапазоне измеряемых скоростей частиц были проведены на специально созданной установке.

На этой же экспериментальной установке провели несколько серий опытов групповым и радиометрическим методами, с целью определения необходимого числа повторностей для достижения точности получаемых опытных данных о скорости частиц зернопродуктов в пределах 5%.

Обработку полученных данных проводили по методу средних и наименьших квадратов. Для вычислений использовали электрические счетные машины САР-Ц.

В пятой главе приведены результаты определения скорости витания исследуемых продуктов, а также точности измерений, достигаемой избранными методами и средствами.

Скорость витания оказалась равной для зерна пшеницы $v_{\text{вит}} = 8,6 - 8,8$ м/сек, для продукта второй драной системы $v_{\text{вит}} = 2,03$ м/сек, для отрубей $v_{\text{вит}} = 1,03$ м/сек.

Изготовленные модели зерновок из пластмассы, содержащие радиоактивный изотоп, имели скорость витания и линейные размеры, мало отличающиеся от зерновок пшеницы ($v_{\text{вит}} = 8,4 - 8,6$ м/сек). При определении скорости витания в трубах, диаметром 108 и 41 мм, обнаружили ее зависимость от условий стесненности, что отмечалось в исследованиях Дзядзио А. М., Кеммера А. С., Успенского В. А. и др.

При испытании отсечных задвижек на лабораторном стенде и экспериментальной установке, добившись одновременно

сти их срабатывания, определяли скорость закрывания, а также сходимость повторных измерений количества продукта, остающегося в отсеках. Последнее позволило в результате математической обработки установить, что для получения экспериментальных данных о скорости материала с точностью 5% необходимо каждую серию опытов выполнять не менее, чем в трех повторностях.

Выявили, что радиометрический метод позволяет измерять скорость частицы в пределах предполагаемых величин их значений с отклонениями, не превышающими 2,96%.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что скорость частицы непостоянна и изменяется неравномерно по длине материалопровода, увеличиваясь по мере удаления от места загрузки.

Причинами неустойчивости движения частиц при пневмотранспортировании в вертикальных материалопроводах, по-видимому, можно считать:

1. Неравномерность поля скоростей воздушного потока в поперечном сечении материалопровода.
2. Интенсивное вращение частиц, что ведет к изменению миделева сечения и перемещению частиц в направлении, перпендикулярном движению.
3. Торможение движущихся частиц в результате ударов о стенки материалопровода, а также в результате столкновения с другими частицами.

Следствием неустойчивости процесса пневмотранспортирования явились существенные расхождения результатов измерения скорости частиц зернопродуктов в некоторых опытах. Поэтому, с целью повышения точности экспериментов, их проводили в 7—8 кратных повторностях. После осреднения опытных данных радиометрический и групповой методы измерения скорости частиц имели удовлетворительную сходимость, за исключением случаев транспортирования пшеницы при скорости воздуха 35 м/сек, а также отрубей и продуктов 2-й дражной системы при скорости воздуха 30 и 35 м/сек. Вследствие этого данные указанных серий опытов при обработке не использованы.

В шестой главе приведены обобщенные результаты изучения скорости частиц зернопродуктов при вертикальном пневмотранспорте.

Полученные данные позволили с некоторым приближением, связанным как с точностью принятых методов измерения, так и с неустойчивостью течения процесса пневмотранспортирования, установить местную скорость частиц зернопродуктов

(v_m) относительно стенки вертикального материалопровода. При этом местной скоростью частиц (v_m) считали среднюю величину проекций их абсолютных скоростей в данном сечении на определенном расстоянии от начала материалопровода на направление перемещения (вертикальную плоскость).

Кроме того определили среднюю скорость транспортируемых частиц зернопродуктов $(v_{m,ср})$ под которой понимали скорость материала на участке от начала материалопровода до рассматриваемого сечения.

Для определения этих величин изучали зависимость скорости зернопродуктов (v_m) от составляющих уравнения (12).

В табл. 1 приведены некоторые экспериментальные данные о скоростях зернопродуктов, измеренных двумя способами, которые привели к следующим выводам:

а) увеличение скорости зернопродуктов происходит наиболее интенсивно в начале материалопровода на т. н. «разгонном участке», но продолжается, хотя и с меньшим ускорением, на следующем за ним, т. н. «участке установившегося движения»;

б) наибольшее влияние на скорость транспортирования материала, при прочих равных условиях ($G_m = idem$, $v = idem$, $D = idem$, $l = idem$) оказывает скорость витания $(v_{вит})$. Чем больше скорость витания, тем меньше скорость частиц;

в) с увеличением или уменьшением скорости воздушного потока (v) соответственно изменяется скорость материала.

Данные табл. 1 показывают, что равенство

$$v_m = v - v_{вит} \quad (1)$$

справедливо лишь на небольшом участке транспортирования, расположенном на некотором расстоянии от места ввода продукта в материалопровод. Далее скорость материала продолжает увеличиваться и соблюдается неравенство

$$v_m > (v - v_{вит}) \quad (13)$$

Однако, при транспортировании зернопродуктов с небольшой средневзвешенной скоростью витания (отруби $v_{вит} = 1.03$ м/сек) и высокой плотностью нагрузки $\left(\frac{G}{F} = 142 \text{ кг/м}^2 \text{ сек}\right)$ на расстоянии 16,55 м от начала материалопровода скорость продукта оказалась равной и даже несколько выше скорости воздушного потока (отнесенной к началу материалопровода)

$$v_m \geq v \quad (14)$$

Следует полагать, что причина этого несоответствия нера-

Скорость частиц зернопродуктов (v_m), измеренная разными методами

Диаметр материала, мм D	Скорость воздуха, м/сек v	Производительность материала, тн/час G	Плотность на-грузки G/F $\frac{кг}{сек\cdot м^2}$	Продукт	Ско- рость вита- ния м/сек. $v_{вит}$	Метод измерения	Скорость частиц на расстоянии от начала материалапровода, метров (в скобках — при радиометрии)										
							0,265 (0,25)	0,83 (0,75)	1,43 (1,29)	2,48 (2,74)	3,73 (4,37)	4,73 (5,83)	5,98 (6,93)	7,73 (9,47)	10,23 (12,0)	13,23 (15,55)	16,55 (17,7)
100	20	4,0	142	Зерно II др. сис- тема	8,6	Задвижки	5,1	6,7	7,8	8,9	9,8	10,4	11,1	11,7	12,6	13,5	15,6
100	20	4,0	142		2,03	»	7,0	9,4	10,8	12,4	13,8	14,6	15,5	16,4	17,8	18,9	20,0
100	20	4,0	142	Отруби	1,03	»	7,3	9,8	11,3	13,0	14,4	15,3	16,2	17,2	18,5	19,8	20,9
100	20	2,0	71	Зерно	8,6	Радиометрия	4,5	6,0	6,8	8,3	9,3	9,7	10,4	11,2	11,9	12,7	13,2
100	30	2,0	71	Зерно	8,6	»	7,4	9,7	11,1	13,5	15,1	15,9	17,0	18,4	19,5	20,7	21,5
52,5	15	1,0	128	Отруби	1,03	Задвижки	5,7	7,7	8,8	10,1	11,2	11,9	12,6	13,4	14,5	15,4	16,3
52,5	20	1,0	128	Отруби	1,03	»	7,3	9,7	11,1	12,8	14,2	15,0	15,9	17,0	18,3	19,5	20,6
52,5	25	0	0	Зерно	8,6	Радиометрия	—	7,4	8,5	10,3	11,5	12,1	12,9	14,0	14,9	15,8	16,5
52,5	25	0,5	64	Зерно	8,6	»	—	7,8	9,0	10,9	12,3	12,8	13,8	14,5	15,8	16,4	17,4
52,5	25	1,0	127	Зерно	8,6	»	—	8,4	9,5	11,6	13,0	13,6	14,6	15,7	16,7	17,7	18,4

венству (13) состоит в недоучете непрерывного увеличения скорости воздуха (v) по длине трубопровода, происходящего вследствие уменьшения давления. Поэтому, на основании измерения статических давлений по длине материалопровода и количества продукта в отсеках, определена усредненная по сечению местная скорость воздуха (v'). С учетом v' скорость движения продукта

$$v_m = v' - v_{\text{вит}} \quad (15)$$

не зависит от производительности и диаметра материалопровода. Однако, в ряде случаев, при транспортировании отрубей и продуктов 2-й драной системы на расстоянии 10—15 м от начала материалопровода все же не соблюдалось равенство (15) и даже имела место тенденция к выражению зависимости в виде:

$$v_m \geq (v' - v_{\text{вит}}) \quad (16)$$

Несоответствие зависимости (16) физическому смыслу процесса можно объяснить тем, что при определении местной усредненной по сечению трубопровода скорости воздушного потока (v') не был учтен коэффициент поля скоростей «К», который, по результатам исследований Дзядзио А. М. и нашим экспериментальным данным, составил $K = 0,88$.

При введении этой существенной поправки во всех опытах в пределах протяженности исследуемого материалопровода ($l = 18,5$ м) соблюдается зависимость

$$v_m < (v'' - v_{\text{вит}}) \quad (17)$$

где v'' — локальная максимальная скорость воздушного потока в материалопроводе с учетом изменения статического давления, свободного сечения и коэффициента поля скоростей $K = 0,88$;

г) повышение плотности нагрузки материалопровода $\left(\frac{G}{F}\right)$ при прочих одинаковых условиях ($D = idem$, $l = idem$, $v = idem$, $v_{\text{вит}} = idem$) вызывает увеличение скорости материала, которое обусловлено не столько увеличением объемной концентрации продукта, сколько изменением скорости воздуха, вследствие повышения градиента давления между началом и концом материалопровода, вызванного увеличением нагрузки (G_m).

Анализ данных табл. 1 показывает, что существует комплексная зависимость вида

$$\frac{v_m}{v} = F\left(\frac{\mu}{Fr}, \frac{l}{D}, \frac{v_{\text{вит}}}{v}\right) \quad (12)$$

Логарифмический анаморфоз этой функции для всех исследуемых продуктов в отношении определяющего критерия $\left(\frac{\mu}{Fr}\right)$ представляет систему прямых линий, что указывает на существование степенной зависимости между входящими в нее переменными в виде:

$$\frac{v_m}{v} = a \left(\frac{l}{D}\right)^m \cdot \left(\frac{v_{\text{внт}}}{v}\right)^n \cdot \left(\frac{\mu}{Fr}\right)^q \quad (18)$$

Логарифмирование зависимости (18) по способу наименьших квадратов привело к системе из 384 условных уравнений с 4 неизвестными, из которых, согласно принципу Лежандра, составлено 4 нормальных уравнения. Решение системы линейных уравнений с помощью алгоритма Гаусса дало значение коэффициентов a , m , n и q со сравнительно малыми средне-квадратичными ошибками и позволило получить обобщенную критериальную зависимость:

$$\frac{v_m}{v} = 0,19 \left(\frac{l}{D}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{v}{v_{\text{внт}}}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\mu}{Fr}\right)^{0,07} \quad (19)$$

Откуда:

$$v_m = 0,19 \left(\frac{l}{D}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\mu}{Fr}\right)^{0,07} \cdot \frac{v^{1,2}}{v_{\text{внт}}^{0,2}} \quad (20)$$

При этом в уравнения (19 и 20) были подставлены исходные величины v и $v_{\text{внт}}$ без учета расширения воздуха в процессе пневмотранспортирования. Уравнение (20) подтверждается всей массой опытных данных и действительно при условии:

$$(v > v_{\text{внт}}), \quad v_m > 0, \quad G_m > 0,$$

Оно может быть рекомендовано для расчета скорости движения зернопродуктов в вертикальных материалопроводах в диапазонах:

$$\begin{array}{ll} v = 15 \div 35 \text{ м/сек} & v_{\text{внт}} = 1,0 \div 9,3 \text{ м/сек} \\ \mu = 0,5 \div 10,0 \text{ кг/кг} & D = 50 \div 150 \text{ мм} \\ \frac{l}{D} = 2,5 \div 320 & \frac{\mu}{Fr} = 0,7 \cdot 10^{-3} \div 35 \cdot 10^{-3} \end{array}$$

При сравнении расчетных и замеренных значений v_m максимальное расхождение составило $\pm 9\%$, что является, в основном, следствием неустойчивости процесса пневмотранспортирования.

При использовании пневмотранспорта для технологических целей: сушки во взвешенном состоянии, охлаждения, кондиционирования, а также для уточнения расчетных формул, необходимо знать не только местную скорость материала v_m , но и среднюю $v_{m,ср}$ — от начала пневмотранспортирования до рассматриваемого сечения материалопровода.

Установленная по результатам аналитической обработки зависимость v_m от других факторов

$$v_m = f(v_{\text{вит}}, l \dots)$$

и графическое изображение ее показывают, что уравнение (20) можно записать в виде:

$$v_m = k \cdot l^{0,25} \quad (21)$$

где

$$k = 0,19 \left(\frac{\mu}{Fr} \right)^{0,07} \cdot \frac{v^{1,2}}{D^{0,25} v_{\text{вит}}^{0,2}} \quad (22)$$

Аналитическое определение зависимости средней скорости движения материала ($v_{m,ср}$) от длины материалопровода при известной местной скорости частиц продукта (v_m) приводит к выражению:

$$v_m \cdot dl = k \cdot l^{0,25} \cdot dl \quad (23)$$

откуда:

$$v_{m,ср} = \frac{1}{l} \int_0^l k l^{0,25} \cdot dl = 0,8 k l^{0,25} = 0,8 v_m \quad (24)$$

Таким образом, между средней скоростью транспортируемых зернопродуктов ($v_{m,ср}$) и местной скоростью (v_m) имеется следующая зависимость:

$$v_{m,ср} = 0,8 v_m \quad (25)$$

$$v_m = 1,25 v_{m,ср} \quad (26)$$

Экспериментально полученное соотношение v_m и $v_{m,ср}$ вполне удовлетворительно соответствует зависимости (25).

Для удобства пользования формулой (24) составлены расчетные графики рис. 2 и 3, в основу которых положена несколько преобразованная формула (20)

$$v_m = 0,225 \frac{G_m^{0,07} \cdot l^{0,25}}{v_{\text{вит}}^{0,2} \cdot D^{0,317}} v \quad (27)$$

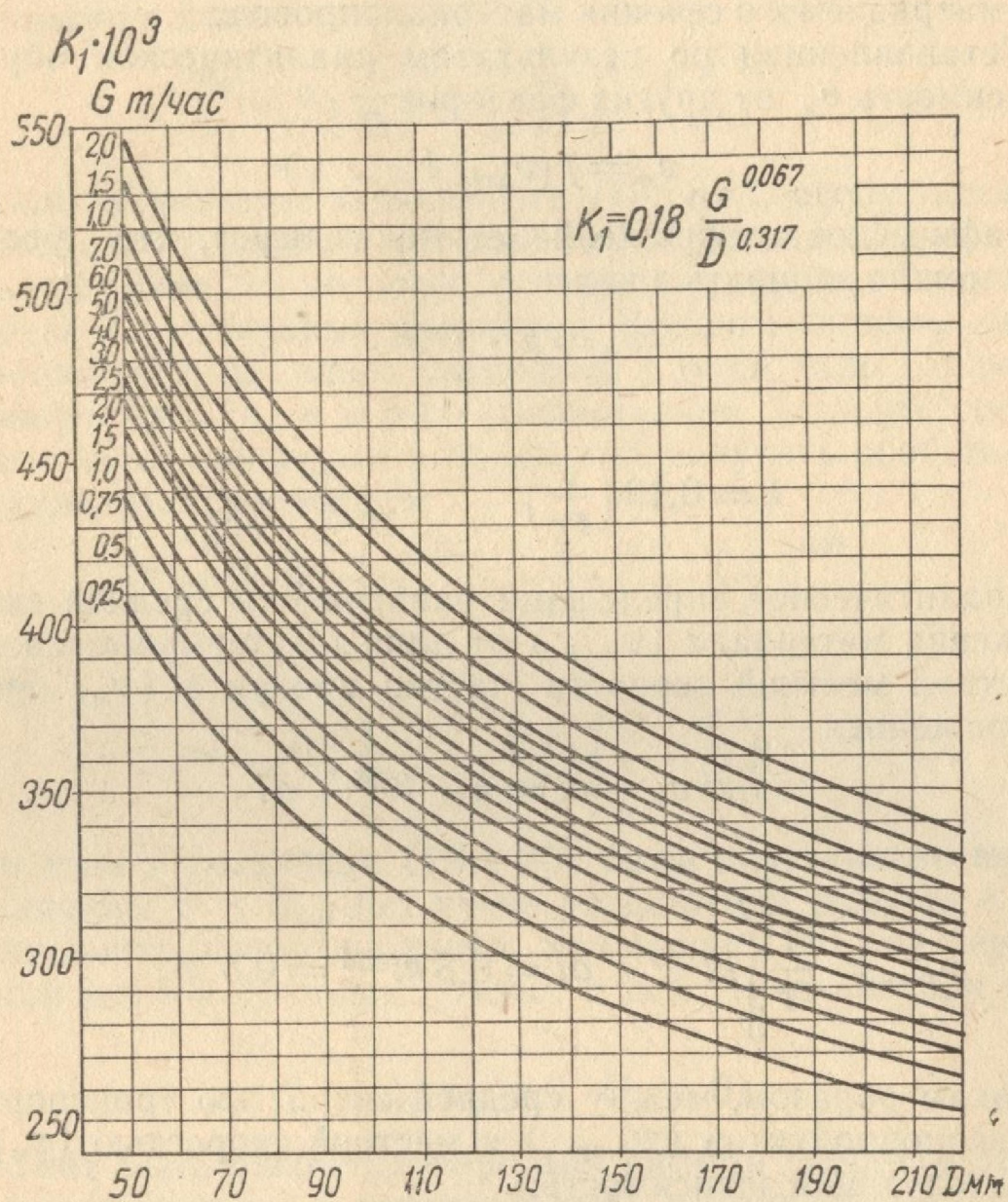


Рис. 2

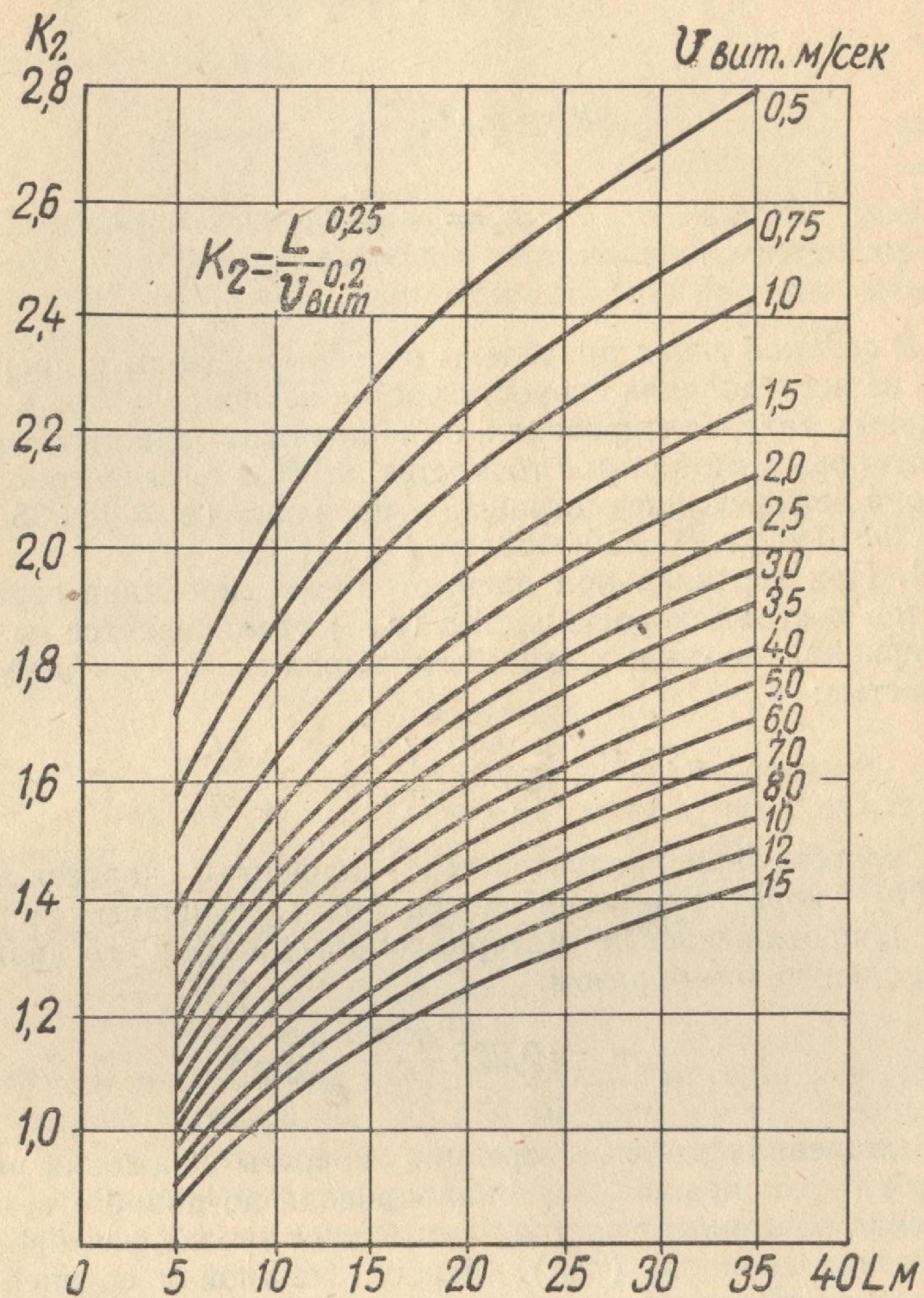


Рис. 3.

Определение $v_{м.ср}$ при помощи графиков проводится по формуле:

$$v_{м.ср} = k_1 \cdot k_2 \cdot v \quad (28)$$

где:

$$k_1 = 0,18 \frac{G^{0,07}}{D^{0,317}} \quad (29)$$

$$k_2 = \frac{l^{0,25}}{v_{вит}^{0,2}} \quad (30)$$

В седьмой главе приведены основные выводы и предложения из исследования скорости частиц зернопродуктов в вертикальных материалопроводах, выполненного радиометрическим и групповым методами с точностью $\pm 9\%$ в определенном диапазоне режимов пневмотранспортирования ($v = 15 \div 35$ м/сек, $\mu = 0 \div 10$ кг/кг, $D = 50 \div 100$ мм, $l = 20$ м):

1. При вертикальном пневмотранспортировании зернопродуктов местная скорость частиц (v_m) увеличивается по длине материалопровода и может быть выражена следующей зависимостью:

$$v_m = 0,19 \left(\frac{\mu}{Fr} \right)^{0,07} \cdot \left(\frac{l}{D} \right)^{0,25} \cdot \frac{v^{1,2}}{v_{вит}^{0,2}} \quad (17)$$

Скорость зернопродуктов (v_m) зависит от скорости воздуха (v), скорости витания частиц ($v_{вит}$), величины нагрузки (G_m), протяженности материалопровода (l) и его диаметра (D), следующим образом:

$$v_m = 0,225 \frac{G^{0,07} \cdot l^{0,25}}{v_{вит}^{0,2} \cdot D^{0,317}} \cdot v \quad (27)$$

Выявленная впервые средняя скорость движения частиц ($v_{м.ср}$) — от начала материалопровода до данного сечения, включая разгонный участок, — зависит от тех же факторов, что и местная скорость (v_m). Между местной и средней скоростью имеется прямая связь:

$$v_{м.ср} = 0,8 v_m \quad (25)$$

или

$$v_{м.ср} = 0,15 \left(\frac{\mu}{Fr} \right)^{0,07} \cdot \left(\frac{l}{D} \right)^{0,25} \cdot \frac{v^{1,2}}{v_{вит}^{0,2}} \quad (31)$$

3. Для определения $v_{м.ср}$ можно пользоваться графиками, составленными по уравнению вида:

$$v_{м.ср} = k_1 \cdot k_2 \cdot v \quad (28)$$

на основании зависимости

$$v_{м.ср} = \frac{G^{0,07} \cdot l^{0,25}}{v_{вит}^{0,2} \cdot D^{0,317}} \cdot v \cdot 0,18 \quad (32)$$

4. Полученные данные о v_m и $v_{м.ср}$ позволяют внести уточнения в расчетные формулы вертикального пневмотранспорта зернопродуктов и рекомендовать при проектировании для определения потерь давления:

а) на разгон продукта:

$$H_p = \frac{1,25 \cdot G_m \cdot v_{м.ср}}{g \cdot F} \quad (33)$$

б) на поддержание во взвешенном состоянии (на подъем)

$$H_{п} = \gamma \rho l \frac{v}{v_{м.ср}} \quad (34)$$

Вместо ранее применявшейся зависимости

$$H_{п} = \gamma \rho l \quad (35)$$

5. При выполнении ряда производственных операций, связанных с движением массы частиц (нагрева, сушки, охлаждения, кондиционирования), предложенные уравнения (31 и 32) могут быть использованы для нахождения среднего времени пребывания частиц продукта в материалопроводе:

$$t = \frac{l}{v_{м.ср}} \quad (36)$$

6. В ходе выполнения работы уточнена методика исследования скорости материала при пневмотранспорте. Сконструированы экспериментальные установки для определения скорости частиц зернопродуктов радиометрическим и групповым (отсечным) методами при вертикальном пневмотранспортировании.

Даны сравнительная характеристика шлюзового, валкового и вибрлоткового питателей и некоторые другие сведения, небесполезные для дальнейшего исследования сложного процесса пневмотранспортирования в разных отраслях промышленности.

СПИСОК

работ, опубликованных автором по материалам
диссертации

1. Определение скорости зерна в трубопроводе методом радиоактивных индикаторов. (В соавторстве с Е. С. Перцовским, Х. И. Хигером, Н. Д. Лерманом, Н. Г. Липилиным). Труды ВНИИЗ, выпуск № 53, 3—11, М., 1965.
2. Скорость частиц зернопродуктов при вертикальном пневмотранспорте. (В соавторстве с В. С. Пальцевым). Мукомольно-элеваторная промышленность № 6, 18—21, Хлебоиздат, М., 1965.
3. Устройство для изменения направления транспортирования продукта воздухом. Авторское свидетельство № 161662. (В соавторстве с Н. В. Пежинковым) 1963.
4. Сравнительное испытание питателей для пневмоустановок. Труды ВНИИЗ, выпуск № 55 (в печати).
5. Исследование скорости движения зерновых продуктов при вертикальном пневмотранспортировании (в соавторстве с А. С. Кеммером). Известия высших учебных заведений. Пищевая технология (в печати). № 6. 1965