

Автор ер.

В 19

Министерство высшего и среднего специального
образования У С С Р

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВА Галина Александровна

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЗЕРНИСТОГО МАТЕРИАЛА

(Применительно к зерноперерабатывающим
предприятиям)

05.02.14 - Машины и агрегаты пищевой
промышленности.

Диссертация написана на русском языке

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1973

Работа выполнена на кафедре "Машины и аппараты пищевых производств" Алтайского политехнического института им. И. И. Ползунова.

Научные руководители - кандидат технических наук,
доцент А.С. Кеммер;
кандидат технических наук,
доцент Г.Ф. Костюк.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор П.Н. Платонов;
кандидат технических наук,
доцент К.И. Куценко.

Ведущее учреждение - Сибирский филиал Всесоюзного научно-исследовательского института зерна.

Автореферат разослан "20" марта 1973 г.

Защита состоится "1" июля 1973 года на заседании Ученого Совета Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке 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

V012175

/Л.А. ЗАПОРОВЕЦ/

~~с. 6. 12. 1975~~ 8 -

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

Принят 1984

ОНАХТ
Исследование аэродинамики



v012175

04.07.11

ВВЕДЕНИЕ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства на 1971-1975 годы ускорение темпов роста научно-технического прогресса предусматривается путем всемерного развития исследований в наиболее перспективных областях науки. Они послужат основой для создания высокопроизводительных машин и процессов технологии.

Во многих отраслях современной техники вопросы внутренней аэродинамики играют решающую роль. Особенно большое промышленное значение в настоящее время приобрели процессы взаимодействия газов и жидкостей с твердыми веществами, такие как взмучивание, отстаивание, гидро- и пневмотранспорт, сепарация, массообменные процессы и другие.

Инженерный расчет этих процессов необходимо рассматривать как важную комплексную физико-техническую и технико-экономическую задачу.

Для расчета и оценки указанных процессов необходимо знание гидродинамической характеристики твердых частиц.

Определяющим параметром аэродинамических свойств твердых частиц принято считать скорость витания их в потоке газа или жидкости, так как она характеризует аэродинамическую силу сопротивления, приложенную к частице.

Аэродинамическая сила, как известно, зависит не только от скорости набегающего потока, но и от характера обтекания самого тела. Поэтому величина скорости витания, для которой справедливо равенство силы сопротивления и веса тела, зависит от формы частицы, состояния её поверхности и от воздействия других факторов, нарушающих режим обтекания частицы.

При взвешивании массы частиц в ограниченном стенками трубы потоке вводится понятие о скорости стесненного витания. Для удобства инженерных расчетов величину скорости витания U_s определяют по свободному сечению трубопровода. Это значит, что величина U_s изменяется с изменением условий стеснения за счет размера, формы канала и количества частиц, находящихся в нем, т.е. скорость стесненного витания зависит от большого числа переменных величин, из которых не все в настоящее время можно учесть не только теоретически, но и экспериментально.

Сложность явлений, происходящих при обтекании частиц потоком газа или жидкости, явилась причиной появления большого количества экспериментальных формул для расчета скорости стесненного витания, справедливых в определенных пределах переменных. Такие формулы приводятся в работах И.Гастерштадта, В.М.Грушко, Г.Р.Карга, Л.С.Клячко, П.С.Козьмина, Б.Н.Лобаева и др.

В настоящее время подход к изучению дисперсных потоков ведется с единой позиции во всем диапазоне изменения концентрации дисперсной среды. В связи с этим понятен тот интерес, который проявляется к аэродинамике стесненного витания или падения частиц зернистого материала в теоретических и экспериментальных работах советских и зарубежных специалистов. Эти вопросы решаются в исследованиях Б.И.Броунштейна, И.А.Вахрушева, А.М.Гаспаряна, Н.И.Гельперина, А.С.Резчикова, В.Р.Горбиса, В.Д.Горошко, Л.Н.Ерковой, А.С.Кеммера, Г.Ф.Костюка, Д.М.Минца, И.М.Разумова, Р.Б.Розенбаума, О.М.Тодеса, В.А.Успенского, Христиансена, С.А.Шуберта и др.

Как показал обзор литературных данных, найдены точные методы определения скорости витания единичных сферических частиц в неограниченном пространстве. Но применимость этих данных в практике ограничена.

Что касается движения тел внутри твердых границ, то даже в простейших случаях обтекания единичных сфер точного решения не установлено.

Накоплен достаточно большой экспериментальный материал по оценке влияния условий стеснения за счет стенок трубы на величину скорости витания для различных зон сопротивлений. Однако полученные зависимости не дают удовлетворительной сходимости.

Предложенные в последние годы критериальные уравнения для расчета скорости стесненного витания учитывают в большей или меньшей степени условия стеснения, вызванные количеством частиц, размером и формой каналов, но справедливые, как правило, для шарообразных или близких к ним по форме частиц. Поэтому применение этих формул для расчета U_s продуктов зерноперерабатывающих предприятий не всегда дает достаточную точность, в особенности для таких материалов, как гречиха, ячмень, кукуруза и др.

Оценка формы частиц не имеет единой методики. Неполны и противоречивы сведения о влиянии концентрации частиц на коэффициент формы.

В литературе малочисленны данные о комплексном исследовании аэродинамической характеристики зернистого материала с учетом условий стеснения за счет стенок трубы, концентрации частиц, формы и состояния их поверхности, поэтому необходимо более широкое исследование указанного вопроса и его обобщение.

Имеющиеся экспериментальные данные по определению U_s показывают, что зависимости коэффициента сопротивления от условий стеснения значительно проще (рис.1), чем зависимость скорости витания от этого же параметра (рис.2). Поэтому в данных исследованиях для получения обобщенной зависимости U_s от ряда факторов определяющим параметром будем считать коэффициент аэродинамиче-

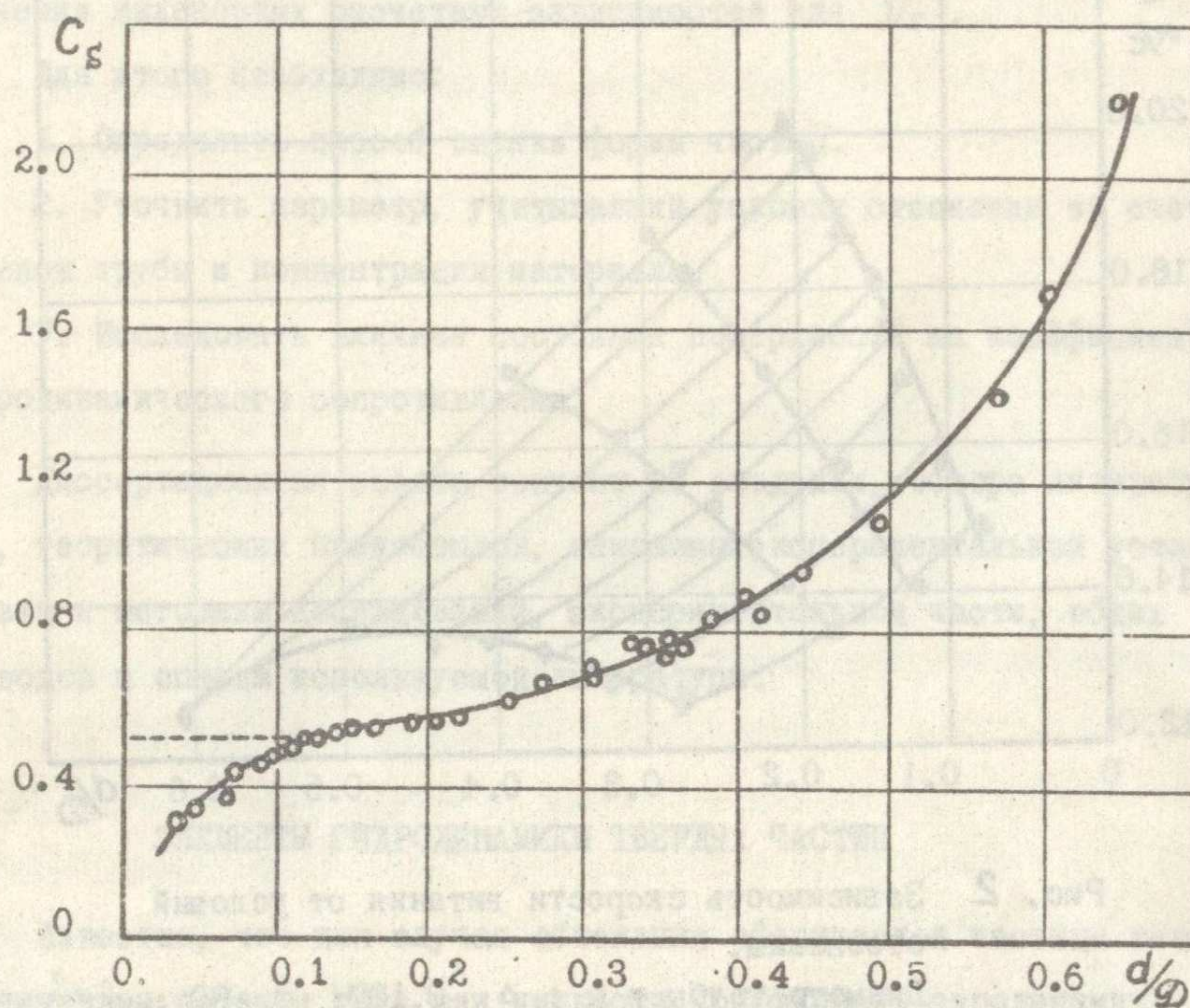


Рис. 1 Зависимость C_g от d/D для одиночных сферических частиц.

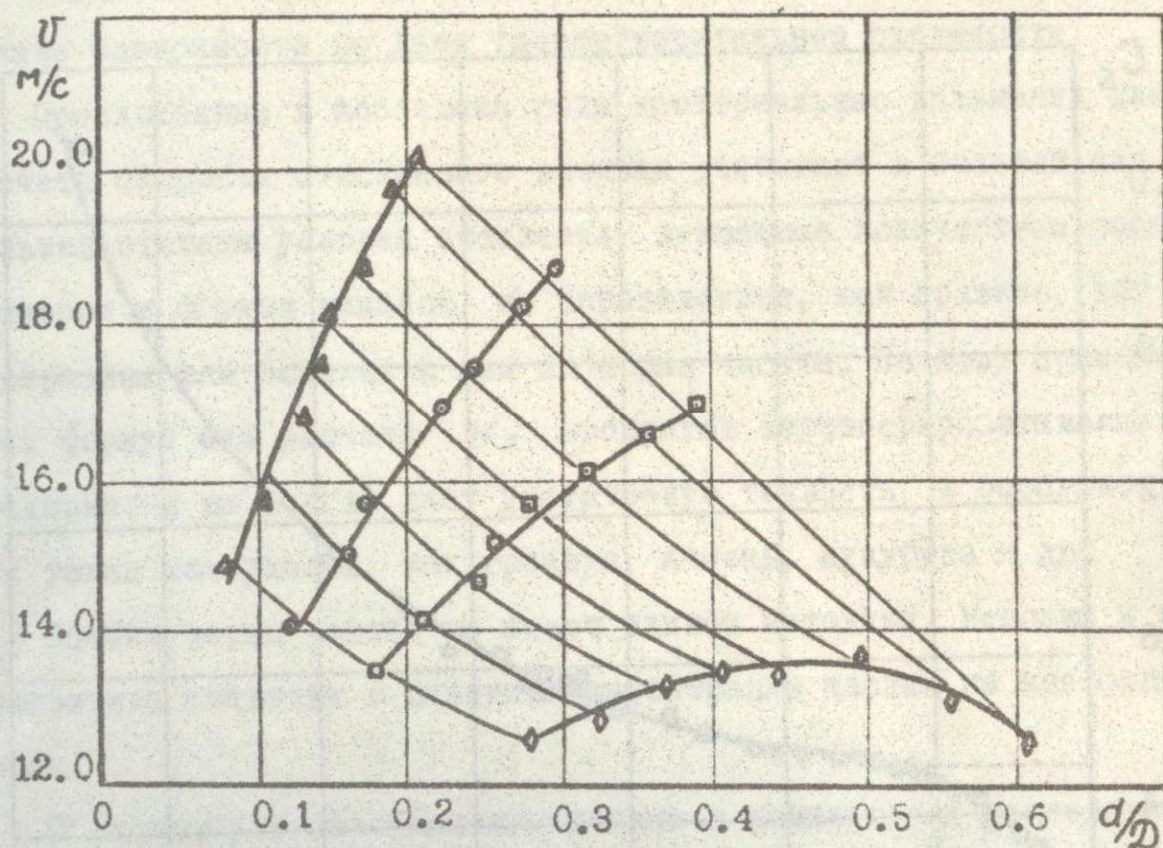


Рис. 2 Зависимость скорости витания от условий стеснения.

Диаметр трубы в м : Δ -0.107; $\circ$ -80 ; 208

$\square$ -57 ; $\diamond$ -36 .

0057

0036

ского сопротивления, что позволит существенно упростить обработку экспериментальных данных.

Таким образом, основной задачей исследования явилось комплексное изучение аэродинамической характеристики зернового и зернистого материала с учетом условий стеснения за счет стенок трубы, концентрации частиц, формы и состояния их поверхности с целью получения инженерных расчетных зависимостей для U_s .

Для этого необходимо:

1. Определить способ оценки формы частиц.
2. Уточнить параметр, учитывающий условия стеснения за счет стенок трубы и концентрации материала.
3. Исследовать влияние состояния поверхности на коэффициент аэродинамического сопротивления.

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, теоретических предпосылок, описания экспериментальной установки и методики исследований, экспериментальной части, общих выводов и списка используемой литературы.

ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОДИНАМИКИ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

Известно, что для случая обтекания сферической частицы неограниченным потоком газа или жидкости коэффициент аэродинамического сопротивления зависит в общем случае от режима обтекания частицы, т.е.

$$C = \varphi(R_e) \quad (I)$$

При этом критерий Рейнольдса определяется по скорости набегающего потока.

Уравнение витания частицы в неограниченной среде в критери-

альной форме имеет вид:

$$Re_b^2 = \frac{4}{3} \frac{Az}{C} \quad (2)$$

Отсюда коэффициент сопротивления частицы равен:

$$C = \frac{4}{3} \frac{Az}{Re_b^2} \quad (3)$$

Для частиц, обтекаемых ограниченным потоком, удобнее пользоваться скоростью набегающего потока, определяемой по свободному сечению трубопровода. Тогда на основании уравнения неразрывности для шара в круглой трубе можно записать

$$v_s = v_0 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (4)$$

Уравнение (3) для коэффициента сопротивления в стесненных условиях примет вид:

$$C_s = \frac{4}{3} \frac{Az}{Re_b^2} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2 \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления шара в стесненных условиях аналогичный коэффициенту сопротивления в свободных условиях, но не равен ему по ряду причин, самый главный из которых, видимо, следует считать то, что распределение скоростей в потоке, обтекающем тело в стесненных условиях, будет зависеть от соотношения размера тела и поперечного сечения трубы. Следовательно, коэффициент сопротивления тела в этом случае представляет собой не только функцию числа Рейнольдса, формы частицы, но и соотношение размера частицы и трубы, т.е.

$$C_s = \varphi \left\{ Re_r ; f ; \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

Для тел и частиц несферической формы аналитического решения обтекания даже в области малых значений Re_r не имеется. Однако

общий характер зависимости сохраняется, если ввести соответствующие коэффициенты формы.

Коэффициент сопротивления частицы несферической формы зависит не только от числа Re_τ , но и от её геометрии, которая характеризуется геометрическим коэффициентом формы $f = \frac{S_f}{S_w}$. Так как динамический коэффициент формы равен отношению коэффициентов сопротивлений несферической частицы и шара, т.е.

$$K_\varphi = \frac{C_f}{C_w}, \quad (7)$$

откуда

$$C_f = K_\varphi \cdot C_w, \quad (8)$$

то очевидно, что между динамическим и геометрическим коэффициентом формы должна существовать взаимосвязь типа:

$$K_\varphi = \varphi(Re_\tau; f). \quad (9)$$

Динамический коэффициент формы, в отличие от геометрического, учитывает взаимодействие несферической частицы с потоком, в то время как геометрический остается величиной постоянной для любого режима обтекания.

Уравнение (6) при обтекании несферической частицы ограниченным потоком записываем:

$$C_S = \varphi \left\{ Re_\tau; K_\varphi; \left[1 - \left(\frac{d_p}{D} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

Для случая взвешивания несферических частиц в массе ей подобных, естественно, картина обтекания не может быть такой же, как и при обтекании шаров. Поэтому следует полагать, что динамический коэффициент формы будет изменяться с ростом концентрации взвешенных частиц, т.е.

$$K_\varphi = \varphi(\beta) \quad (11)$$

Коэффициент сопротивления частицы, взвешенной в массе, тоже принято относить к скорости в свободном от частиц сечении трубы, так как экспериментальное определение скорости в межзерновых каналах представляет определенные трудности. Однако известно, что среднее относительное проходное сечение составляет величину порозности слоя ε .

Связь между средним относительным минимальным проходным сечением и объемной концентрацией записывается:

$$\psi_1 = 1 - 1,2\beta^{2/3}. \quad (I2)$$

Тогда средняя скорость обтекания частиц в межзерновых каналах на основании уравнения (I2) и уравнения неразрывности равна:

$$U_0 = U_s (1 - 1,2\beta^{2/3})^{-1}. \quad (I3)$$

Подставляя значения скорости U_0 в уравнение (3), находим

$$C_\beta = \frac{4}{3} \frac{A_2}{Re_c^2} (1 - 1,2\beta^{2/3})^2. \quad (I4)$$

Выражение справедливо для взвешенного слоя частиц, когда условия стеснения проявляются только за счет концентрации частиц, а соотношение размера частицы и трубопровода достаточно мало. Для этого случая коэффициент сопротивления является функцией числа Рейнольдса, формы и минимального проходного сечения, т.е.

$$C_\beta = \varphi [Re_\tau; K_\varphi; (1 - 1,2\beta^{2/3})]. \quad (I5)$$

Но как показывают литературные данные, влияние стенок трубы заметно увеличивается при $\frac{d}{D} > 0,1$. Значит, в общем случае коэффициент сопротивления зависит не только от концентрации, но и от соотношения размеров трубы и частицы.

В качестве комплексного параметра для оценки условий стеснения в данной работе принят гидравлический радиус, представляющий собой отношение свободного объема к смачиваемой поверхности частиц и трубопровода:

$$R_r = \frac{V_{\text{тп}} - V_{\text{т}}}{\pi D \ell + \pi d_{\text{э}} n},$$

или после преобразования

$$R_r = \frac{\varepsilon \cdot D}{4(1 - 1,5 \frac{D}{d_{\text{э}}} \beta)} \quad (I6)$$

который включает в себя величину объемной концентрации частиц и соотношение размеров трубы и частицы.

В случае витания одной частицы в трубопроводе диаметром D величину R_r определяют, как отношение поперечного сечения потока к смоченному периметру, т.е.

$$R_r = \frac{D - d_{\text{э}}}{4}, \quad (I7)$$

откуда

$$D = 4R_r + d_{\text{э}}.$$

По аналогии с поправкой для одной частицы, взвешенной в трубе, поправку на условия стеснения за счет стенок трубы для слоя частиц можно записать в виде выражения:

$$\psi = \left[1 - \left(\frac{d_{\text{э}}}{4R_r + d_{\text{э}}} \right)^2 \right], \quad (I8)$$

которое для единичной сферы превращается в

$$\psi = \left[1 - \left(\frac{d_{\text{э}}}{D} \right)^2 \right].$$

Следовательно, коэффициент частицы в общем случае с учетом состояния её поверхности представляет собой зависимость:

$$C_{s\beta} = \varphi \left\{ Re_{\text{т}}; K_{\varphi}; \frac{D}{d_{\text{э}}}; (1 - 1,2 \beta^{2/3}); \left[1 - \left(\frac{d_{\text{э}}}{4R_r + d_{\text{э}}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (I9)$$

получившую экспериментальное подтверждение в широком диапазоне изменения Re_τ , K_ϕ , $\frac{d}{D}$, β , $\frac{A}{d}$.

ОБЪЕМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

Объем экспериментальных исследований определяется с учетом диапазона изменения основных аэродинамических параметров, характеризующих промышленные процессы в двухфазных системах применительно к зерноперерабатывающим предприятиям. Выбор основных параметров и диапазон их изменения исходит из необходимости определения суммы опытных данных, подтверждающих полученные критериальные уравнения, которые необходимо привести к явному расчетному виду путем обработки экспериментальных данных, установив при этом границы их применимости.

Эксперимент следует ставить согласно (I9) в трубах различных диаметров, на материале различной крупности, плотности, формы и состояния поверхности, при различной его концентрации. Для этого изготовлены единичные сферические частицы из материалов плотностью от 500 кг/м^3 до 2100 кг/м^3 . Единичные несферические частицы, но геометрически правильной формы, из оргстекла имеют одинаковый эквивалентный диаметр по объему, но различную величину поверхности.

Для исследования влияния концентраций частиц на коэффициент сопротивления изготовлена масса сферических и несферических, но также геометрически правильных форм, частиц из капрона путем литья под давлением в специальные прессформы. Сферические частицы за счет добавления в них дробинек разного размера имеют плотность от 1100 кг/м^3 до 2100 кг/м^3 .

Кроме эталонных частиц, зависимость коэффициента сопротивления от концентрации изучалась на монодисперсных фракциях зернового материала, такого как пшеница, соя, просо, гречиха.

Определяется скорость витания, а затем и коэффициент сопротивления на полидисперсном зерновом материале. Причем для опытов берется один и тот же зерновой материал двух или трех различных сортов с целью определения колебания величины коэффициента сопротивления для одной и той же культуры при различных физико-механических параметрах.

Влияние шероховатости поверхности изучается на сферических частицах с искусственной шероховатостью $\frac{\Delta}{d_p}$ от 0,02 до 0,1.

Эксперимент проводится в стеклянных трубах диаметром 0,036, 0,057, 0,080, 0,104, 0,150, 0,200 м.

На основании проведенных поисковых экспериментов было установлено необходимое количество опытов на различных материалах.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СТЕСНЕНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Изучение зависимости скорости витания от соотношения размера частицы и размера трубы было объектом исследования многих экспериментальных работ. Полученные результаты, например, для квадратичной зоны сопротивлений не дают удовлетворительную сходимость.

По результатам данной работы получено, что для единичных частиц, взвешенных в трубопроводе, коэффициент сопротивления, рассчитанный по свободному сечению трубы, не остается величиной постоянной во всем диапазоне изменения $\frac{d}{D}$. Причем зависимость (рис.1) имеет точку перегиба при $\frac{d}{D} \approx 0,1$. Точка перегиба указанной зависимости, видимо, связана с тем, что частица витает,

как правило, вдоль стенки трубы и если ее размер соизмерим с размером пристенного слоя, то истинная скорость набегающего потока значительно меньше, чем принимаемая при расчете средняя скорость по свободному сечению, что ведет к занижению коэффициента сопротивления. Это подтверждается тем, что величина C , определенная по истинной скорости набегающего потока для "мелкой" частицы, если принять степенной закон распределения скоростей в сечении трубы, т.е.

$$v_n = v_{max} \left(\frac{d}{D} \right)^n, \quad (20)$$

остается практически постоянной до $\frac{d}{D} < 0,1$, приблизительно равной для сферической частицы 0,56. Это несколько больше коэффициента сопротивления шара, при свободном его падении, что вполне естественно, потому что эти два движения нельзя считать полностью обратимыми.

Влиянием пристенного слоя можно объяснить и изменение средне-взвешенной скорости витания полидисперсного материала при $\frac{d}{D} < 0,1$ (рис.3).

Поэтому экспериментальное определение скоростей витания зернистого материала наиболее целесообразно вести при соотношении размера частицы и размера трубы $\frac{d}{D} \approx 0,1$, при котором уже практически не влияет пристенный слой и еще почти не проявляются условия стеснения.

Кроме того, влияние пристенного слоя оказывает влияние и на эффект сепарирования. Как показано на рис.4 лучшее разделение смеси двух зерновых культур происходит в более узких каналах. При взвешивании массы монодисперсного материала по различным соотношениям $\frac{d_2}{d_1}$ и при различной их объемной концентрации влияние пристенного слоя не ощутимо и величина коэффициента сопротивления частицы остается величиной постоянной до $\frac{d_2}{D} < 0,1$.

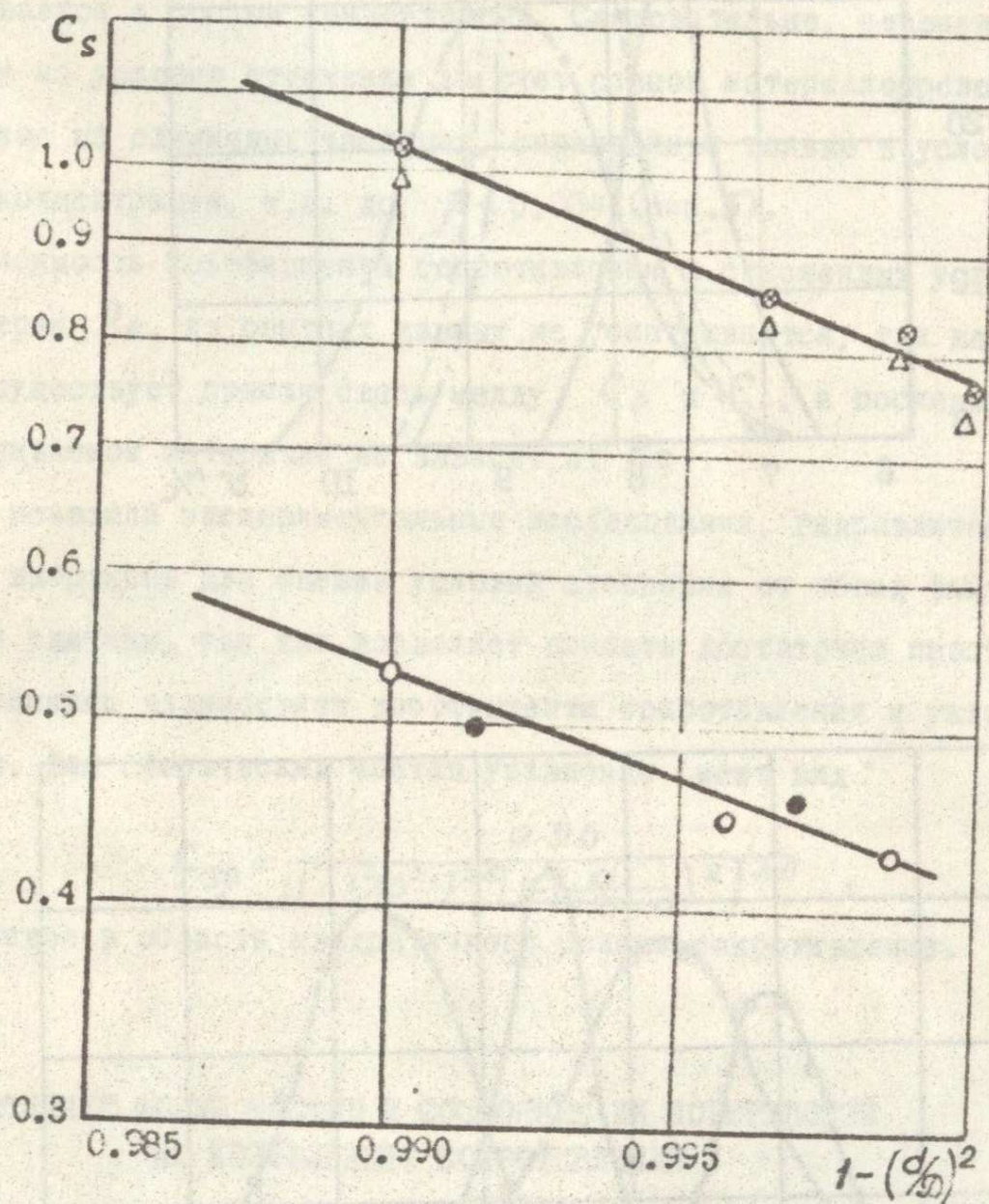


Рис. 3 Зависимость коэффициента сопротивления от стеснения для зернистых материалов
 ○ -горох, серия 14,
 ● -горох, серия 13,
 Δ -пшеница, серия 7,
 ● -рожь, серия 11.

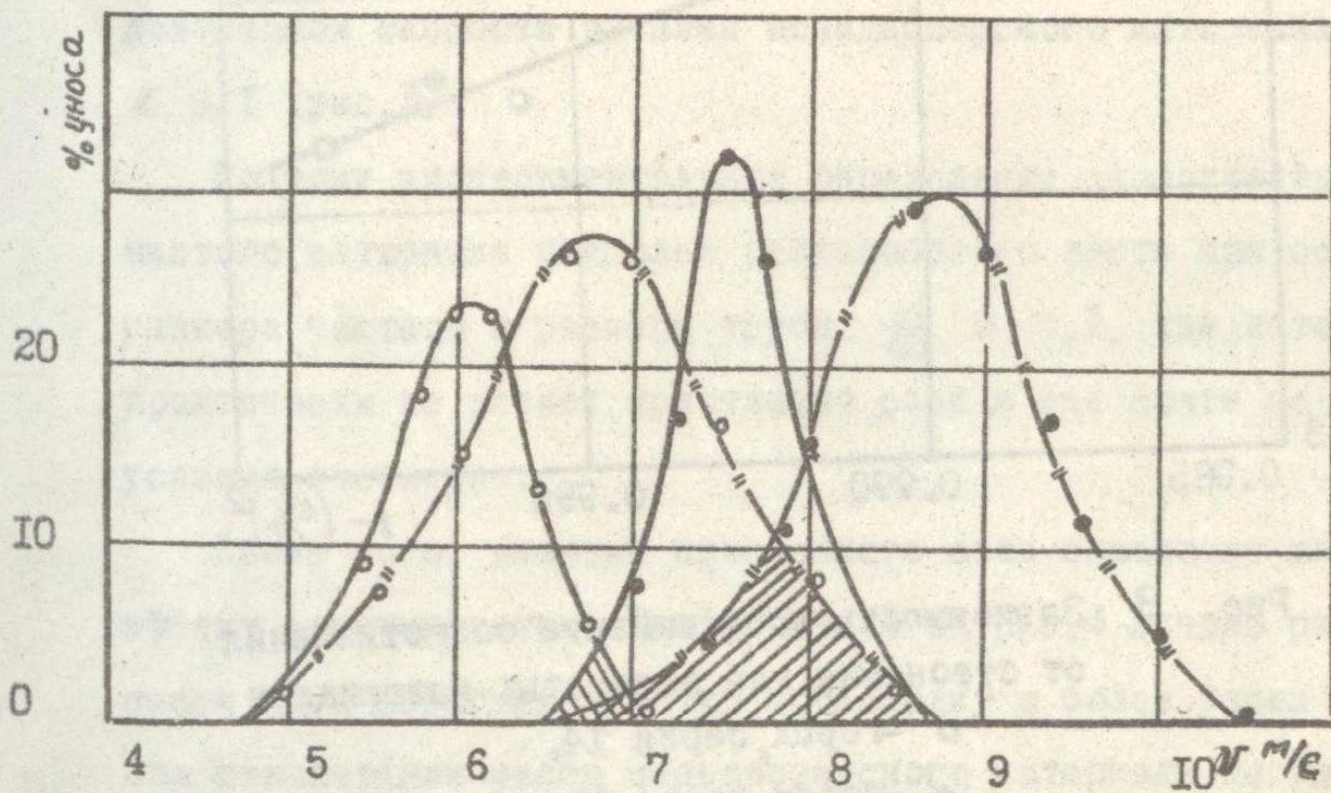
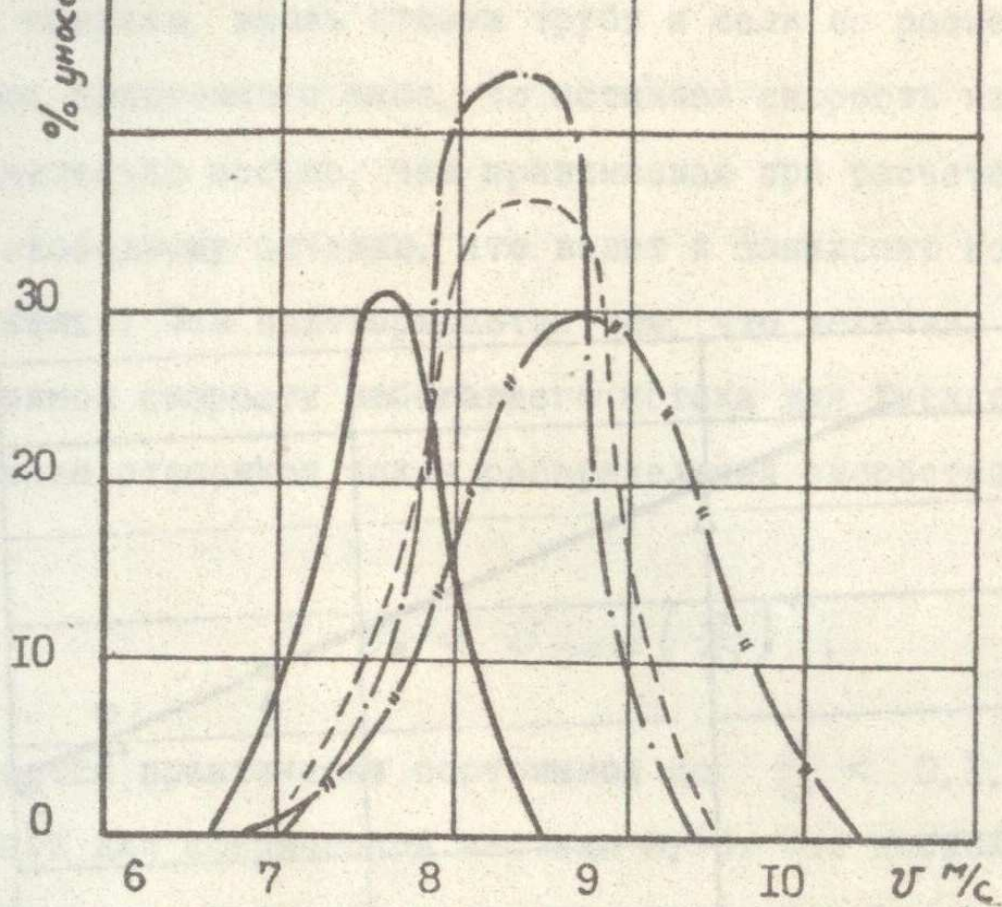


Рис. 4. Вариационные кривые скоростей уноса зерна.

Диаметр трубы в м: — 0,036; — — 0,057;
 - - - 0,107; — " — 0,200.

Условия стеснения за счет стенок трубопровода для частицы, взвешенной в массе ее подоонных, начинают проявляться при $\frac{d_2}{d} > 0,1$, но зависимость эта не аналогична зависимости для единичных частиц, а усиливается с ростом концентрации. Следовательно, рекомендуемые поправки на условия стеснения за счет стенок материалопроводов, полученные на единичных частицах, справедливы только в условиях низких концентраций, т.е. до $\beta < 0,004$ (рис.5).

Зависимость коэффициента сопротивления в стесненных условиях от критерия Re_τ из опытных данных не усматривается, так как, очевидно, существует прямая связь между C_s и C , а последний в рассматриваемом интервале не зависит от Re_τ .

Как показали экспериментальные исследования, гидравлический радиус, выбранный для оценки условий стеснения от обоих факторов является удачным, так как позволяет описать достаточно просто одним уравнением взаимосвязи коэффициента сопротивления и указанных факторов. Для сферических частиц уравнение имеет вид:

$$C_{s\beta} = \frac{0.56}{(1 - 1.2\beta^{2/3})^{2.8} \left[1 - \left(\frac{d}{4R_i + d}\right)^2\right]^{2.4}}, \quad (21)$$

справедливое в области квадратичного режима сопротивлений.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЧАСТИЦ И СОСТОЯНИЕ ИХ ПОВЕРХНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ

На основании литературного обзора и анализа существующих методов оценки формы частицы представляется наиболее целесообразным учитывать отклонение формы частицы от сферической при определении её аэродинамических свойств динамическим коэффициентом формы. Но для нахождения последнего необходимы специальные эксперименты. В данной работе одной из задач явилось отыскание взаимо-

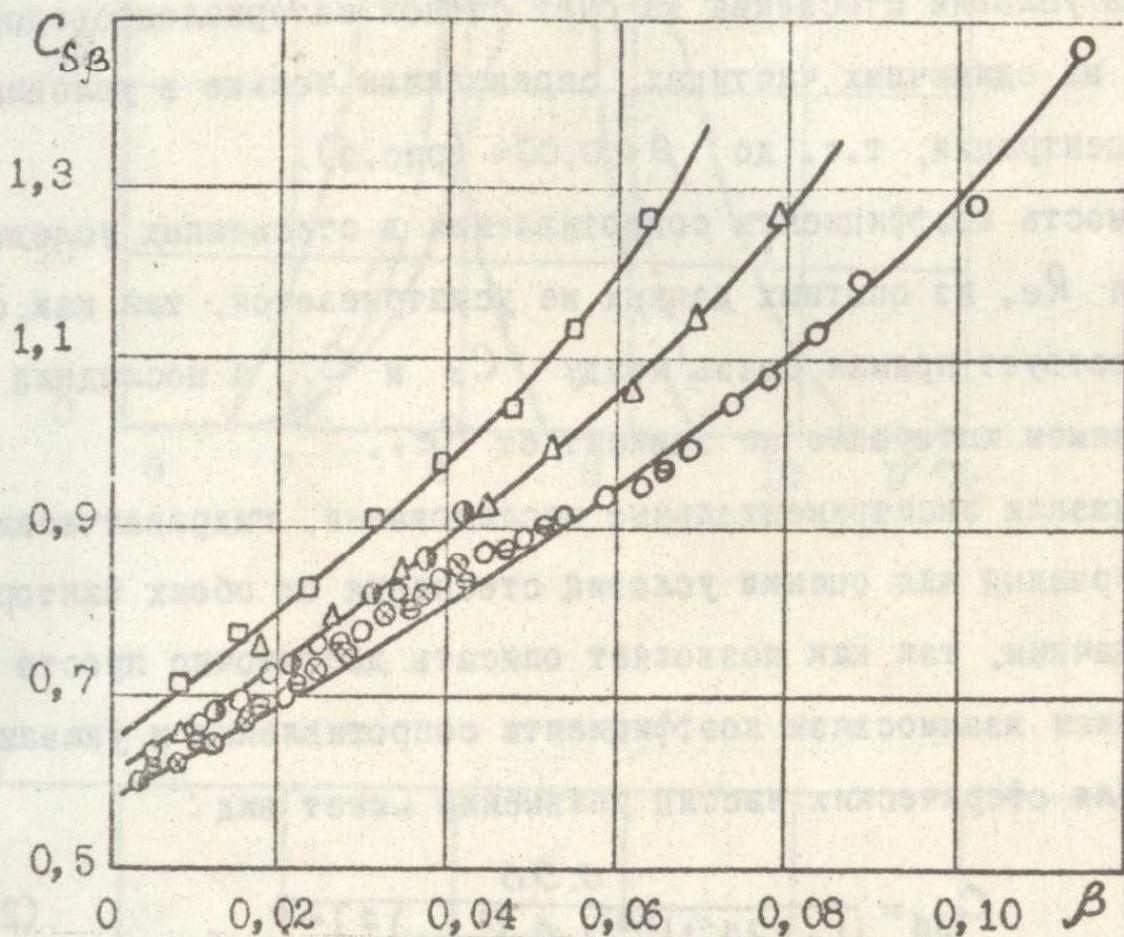


Рис. 5. Зависимость коэффициента сопротивления от концентрации для сферических частиц.

Диаметр трубы и частицы в м; $\phi 0,200$:

⊗ = 0,010; $\phi 0,107$: ● = 0,015, ○ - 0,010,
 ⊗ - 0,008, ○ - 0,006; $\phi = 0,080$:
 △ - 0,010; $\phi 36$: □ - 0,010.

связи между динамическим и геометрическим коэффициентами формы в области квадратичного закона сопротивлений.

В свою очередь, для определения геометрического коэффициента формы требуется знание поверхности, что для частиц произвольной формы представляет определенные трудности. Из всех существующих методов оценки поверхности частиц наиболее подходящим для зернистого материала можно считать метод определения поверхности частицы по трем её измерениям в перпендикулярных плоскостях. Этот метод применяется для обломочных частиц, у которых установлена устойчивая связь между размерами и объемом или размерами и поверхностью для генетически однородных частиц.

Форма частиц каждого зернового материала одинакова, поэтому для них тем более связь между размерами и поверхностью совершенно устойчива. Известно, что для пшеницы величину поверхности можно рассчитать по формуле:

$$F = 4\pi B(\ell + 3B), \quad (22)$$

где $B = \frac{5a + 6b}{60}$.

Для кукурузы:

$$F = \pi B \left(B + \sqrt{\ell^2 + B^2} \right), \quad (23)$$

где $B = \frac{a-b}{\pi} + \frac{b}{2}$.

В работе поставлены специальные исследования по определению площади поверхности зернового материала с помощью колодия. Сравнение опытных и расчетных по формулам (22), (23) данных позволяет считать, что указанные зависимости достаточно точно описывают поверхность частицы по трем её измерениям. Кроме того, формула (22) может быть использована для определения поверхности не только пшеницы, но и ячменя, и ржи, а формула (23) – для гречихи.

Связь между геометрическим и динамическим коэффициентами формы описывается уравнением:

$$K_{\varphi} = 7,75 - 2,5 e^{\frac{1}{f}} \quad (24)$$

Но, как показали опытные данные на массе несферических частиц, зависимость коэффициента сопротивления от концентрации усиливается тем больше, чем больше по форме частица отличается от сферической (рис.6). Из этого следует, что динамический коэффициент формы зависит от концентрации. Найдено, что для округлых изометрических частиц эта зависимость имеет вид:

$$K_{\varphi\beta} = K_{\varphi} + 3\beta \quad (25)$$

для острогранных и неизометрических:

$$K_{\varphi\beta} = K_{\varphi} + 7\beta \quad (26)$$

Дальнейшая обработка экспериментальных данных для несферических частиц проводилась с учетом полученных динамических коэффициентов формы по зависимостям (25) и (26). Это позволило учесть условия стеснения за счет стенок трубопровода и концентрации частиц с помощью тех же уравнений, что получены для сферических частиц.

По результатам опытов определено:

$$C_{S\beta} = 0,57 K_{\varphi\beta} (1 - 1,2\beta^{\frac{2}{3}})^{-2,5} \left[1 - \left(\frac{d_2}{4R_r + d_2} \right)^2 \right]^{-2,4} \quad (27)$$

Исследования влияния состояния поверхности на коэффициент сопротивления в работе проведено на шариках с различной искусственной шероховатостью. Для них найдено:

$$C_{\Delta} = 0,55 \left(1 - \frac{\Delta}{d} \right)^{-3} \quad (28)$$

Что касается частиц зернового материала, то по результатам исследований зависимость коэффициента сопротивления от состояния поверхности не обнаружена.

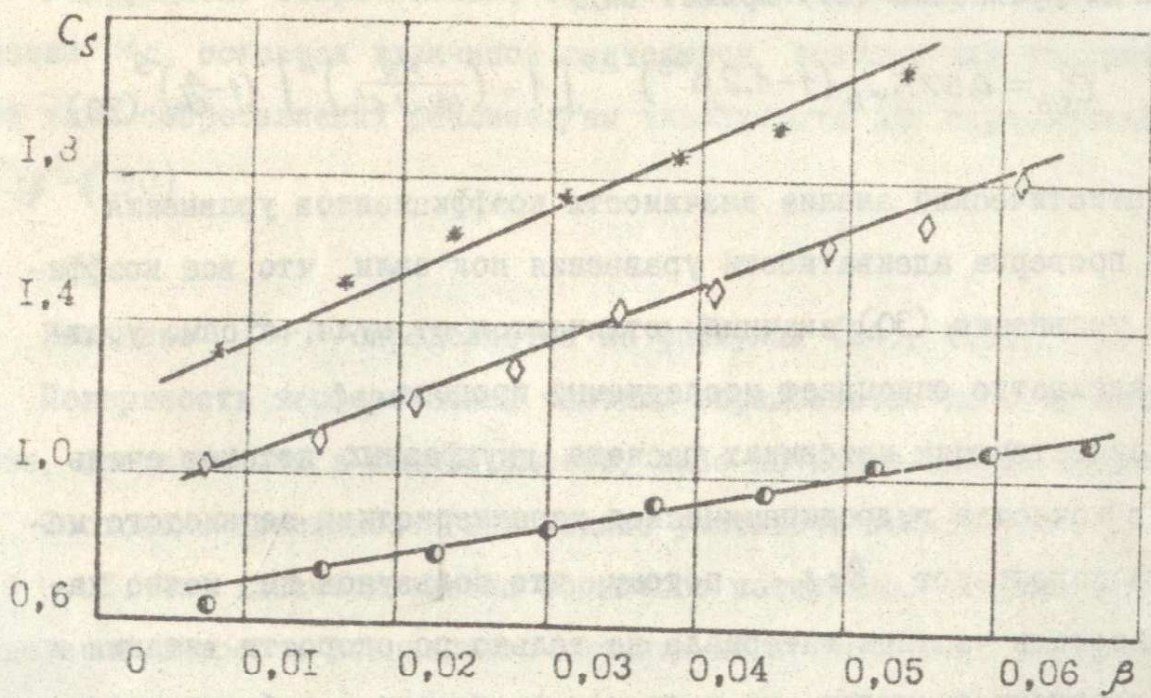
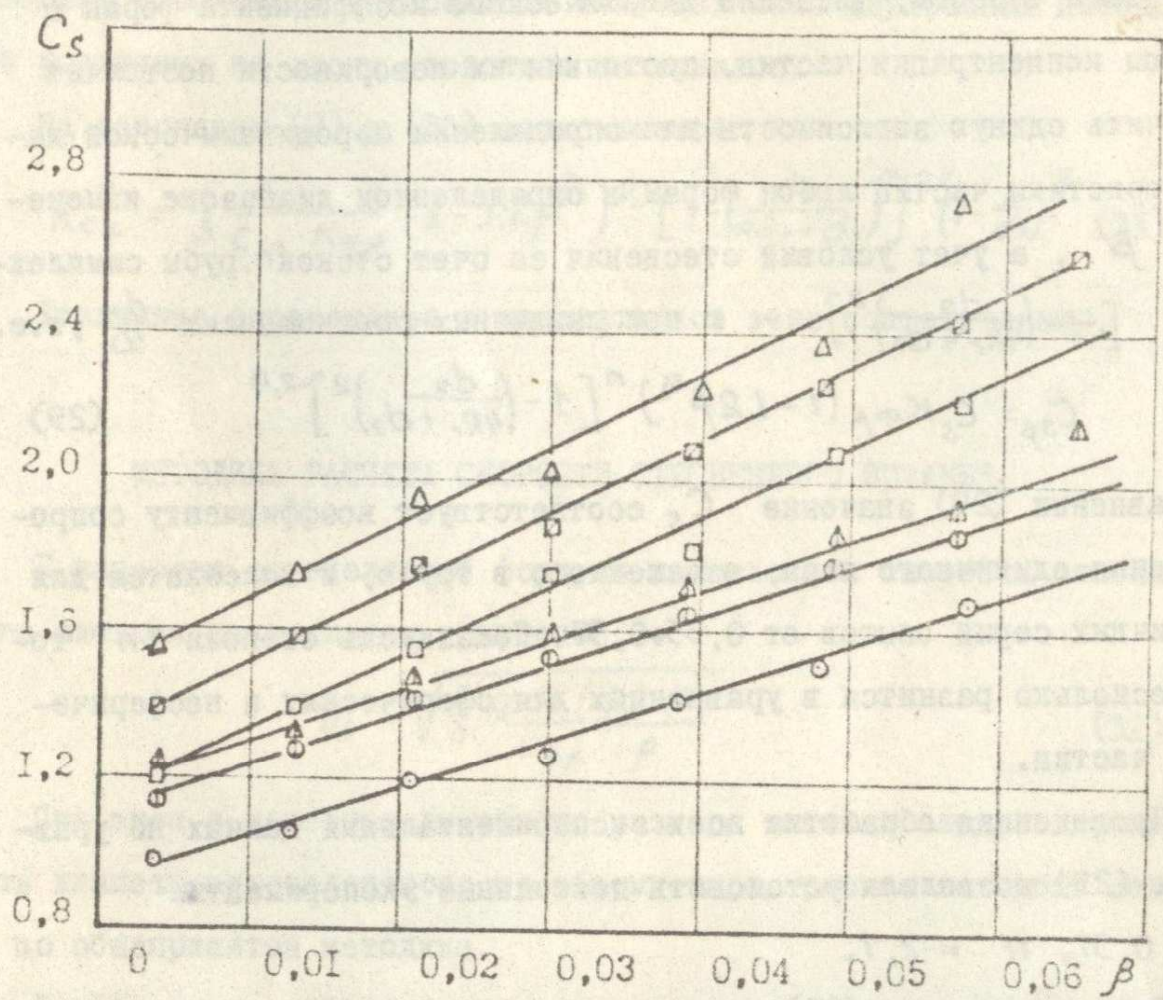


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления от концентрации для зернистого и зернового материалов.
 Δ - призма трехгранная, $\square$ - призма четырехгранная,
 $\triangle$ - конус, $\circ$ - призма шестигранная.
 $\circ$ - цилиндр $l/d = 1.0$ $\ast$ - гречиха, $\diamond$ - пшеница,
 $\circ$ - соя.

Таким образом, введение динамического коэффициента формы с учетом концентрации частиц, состояния их поверхности позволяет получить единую зависимость для определения аэродинамической характеристики частиц любой формы в определенном диапазоне изменения β , а учет условий стеснения за счет стенок трубы симплексом $\left[1 - \left(\frac{d_2}{4R_r + d_2}\right)^2\right]$ - и при различных соотношениях $\frac{d_2}{D}$, т.е.

$$C_{s\beta} = C_s K_{\varphi\beta} (1 - 1.2\beta^{2/3})^n \left[1 - \left(\frac{d_2}{4R_r + d_2}\right)^2\right]^{-2.4} \quad (29)$$

В уравнении (29) значение C_s соответствует коэффициенту сопротивления единичного шара, взвешенного в трубе, и колеблется для различных серий опытов от $0,55 \pm 0,57$. Показатель степени "n" тоже несколько разнится в уравнениях для сферических и несферических частиц.

Проведенная обработка всех экспериментальных данных по уравнению (29) позволила установить постоянные экспериментальные

$$C_s = 0,57, \quad n = -2,7.$$

Тогда уравнение (29) примет вид:

$$C_{s\beta} = 0,57 K_{\varphi\beta} (1 - 1.2\beta^{2/3})^{-2.7} \left[1 - \left(\frac{d_2}{4R_r + d_2}\right)^2\right]^{-2.4} \left(1 - \frac{d_2}{D}\right)^{-3} \quad (30)$$

Статистический анализ значимости коэффициентов уравнения (30) и проверка адекватности уравнения показали, что все коэффициенты уравнения (30) значительно отличаются от нуля, а само уравнение адекватно описывает исследуемый процесс.

В существующих методиках расчета двухфазных потоков очень часто в качестве гидродинамической характеристики зернистого материала используют Re_β , потому что, пользуясь им, можно характеризовать частицы материала не только по скорости витания и эквивалентному диаметру, но и применять теорию подобия к уста-

новлении обобщенной зависимости гидродинамики двухфазных потоков для различных по своим свойствам материалов.

На основании (2) и (30) записывается :

$$Re_{\epsilon}^2 = \frac{4}{3} \frac{\Lambda z}{C_{s\beta} \cdot K_{\varphi\beta}} (1 - 1.2\beta^{\frac{2}{3}})^{2.7} \left[1 - \left(\frac{d_3}{4R_r + d_3} \right)^2 \right]^{2.4} \left(1 - \frac{\Lambda}{d_3} \right)^3 \quad (31)$$

Уравнение справедливо в квадратичной зоне сопротивлений.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СКОРОСТИ СТЕСНЕННОГО ВИТАНИЯ

В качестве определяющей формулы для расчета скорости стесненного витания рекомендуем уравнение:

$$v_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g d_3 (\rho_r - \rho)}{C_{s\beta} \cdot \rho}} \quad (32)$$

При этом в качестве линейного размера частицы следует принимать диаметр эквивалентного по объему шара, расчет которого ведется по общепринятой методике.

Коэффициент сопротивления зернистого материала в большом диапазоне Re , остается величиной постоянной, поэтому для квадратичной зоны сопротивлений рекомендуем зависимость для определения

$$C_{s\beta} - (30)$$

Значение $K_{\varphi\beta}$ определяется по формулам (24), (25), (26).

Поверхность несферической частицы определяется либо по методике, предлагаемой в данной работе, либо по какой-нибудь другой.

Состояние поверхности необходимо учитывать только при $\frac{\Lambda}{d_3} > 0,01$. Что касается частиц зернового материала, то для них определение скорости стесненного витания не представляет никакого труда, так как в данной работе найдены значения коэффициентов аэродинамического сопротивления и динамические коэффициенты формы без учета стеснения. Данные приводятся в таблице I.

Таблица I

Значение коэффициентов аэродинамического
сопротивления и коэффициентов формы для
частиц зернового материала

Наименование материала	C_s	K_f
Пшеница	0,90	1,56
Гречиха	1,30	2,10
Ячмень	0,85	1,50
Овес	1,15	2,00
Рожь	1,05	1,70
Лен	1,05	1,70
Просо	0,60	1,05
Соя	0,60	1,05
Горох	0,55	1,00

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. На основании проведенных нами комплексных экспериментально-теоретических исследований получено обобщенное расчетное уравнение для определения аэродинамической характеристики зернистого материала с учетом целого ряда факторов, имеющих место в реальных промышленных процессах, таких как:

- форма частиц и состояние их поверхности;
- условия стеснения за счет стенок аппарата и концентрации частиц.

2. Предложена методика расчета скорости стесненного витания.

3. Установлено, что определяющим фактором аэродинамического сопротивления является форма частиц. Пренебрежение влиянием формы при расчете аэродинамической характеристики зернистого материала завышает её значение на 50-60%.

Одесский технологический
институт пищевой промышленности
лен

Б И В И Т Е К А

V012175

4. Найдены способы оценки формы частиц с помощью динамического коэффициента.

5. Получена зависимость динамического коэффициента формы от величины поверхности частиц.

6. Установлено, что условия стеснения за счет стенок аппарата проявляются при $\frac{d_2}{D} > 0,1$ как для единичных частиц, так и для взвешенной массы их. Но "мелкие" частицы при низкой их концентрации располагаются у стенок трубы и на них воздействует очень узкий слой воздуха, скорость которого резко падает с уменьшением размера частицы. Это приводит к завышению опытного значения скорости витания мелких частиц и оказывает влияние на эффект сепарирования.

7. Концентрация частиц практически не влияет на коэффициент сопротивления до $\beta < 0,005$.

8. Коэффициент сопротивления шероховатых частиц при $\frac{\Delta}{d_2} > 0,1$ отличается от подобной, с гладкой поверхностью на 50÷60%. Для зернового материала, у которого $\frac{\Delta}{d_2} < 0,006$, по результатам опытов зависимость коэффициента сопротивления от состояния поверхности не обнаружена.

9. Опытные значения коэффициентов сопротивления зернистого материала не зависят от плотности и размера частицы, а следовательно, остаются практически постоянными для каждой культуры (таол. I), это позволяет воспользоваться ими для оценки аэродинамической характеристики зерновых материалов по общепринятой зависимости (32).

10. Полученные в результате исследований зависимости и опытные значения коэффициентов сопротивлений можно рекомендовать для использования при практических инженерных расчетах двухфазных систем с широким диапазоном изменения концентрации.

II. Выводы по работе могут быть полезными для исследователей, изучающих явления, протекающие в дисперсных системах типа "газ - твердые частицы".

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- D - размер канала или трубы, м;
 F - поверхность частицы, m^2 ;
 K_f - динамический коэффициент формы;
 P - давление; Па;
 R - аэродинамическая сила, Н;
 R_r - гидравлический радиус, м;
 $S_{тр}$ - площадь поперечного сечения канала или трубы, m^2 ;
 V - объем частицы, m^3 ;
 C - коэффициент аэродинамического сопротивления;
 d - размер частицы, м;
 f - геометрический коэффициент формы;
 g - ускорение силы тяжести, m/s^2 ;
 m - масса частицы, кг;
 S - миделево сечение, m^2 ;
 v - скорость, м/с;
 β - объемная концентрация;
 ε - порозность;
 ν - коэффициент кинематической вязкости, m^2/s ;
 ρ - плотность, kg/m^3 ;
 ψ - относительное минимальное проходное сечение;
 Re - критерий Рейнольдса, $Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$;
 Az - критерий Архимеда, $Az = \frac{g d^3 (\rho_r - \rho)}{\rho \nu^2}$;

$\frac{\Delta}{d}$ - относительная шероховатость.

И Н Д Е К С Ы

Γ - материал; v - скорость витания; O - скорость обтекания в трубе; λ - локальный; φ - форма, S - стесненный стенками канала или трубы; $S\beta$ - стесненный стенками канала и концентрацией; f - несферическая частица; $\varnothing$ - эквивалентный диаметр; ω - шар.

Основные результаты данной работы доложены на конференции молодых ученых Алтая, посвященной 50-летию ВЛКСМ "Молодежь, наука, созидание", 1968; на Всесоюзной научной конференции по специальным вопросам гидромеханики и газовой динамики двухфазных сред ВНИИПИ, 1971. (г.Томск); на научно-практической конференции "Механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ в промышленности". Барнаул 1971.

Опубликованы в работах:

1. Закономерности стесненного витания. Материал конференции "Специальные вопросы гидромеханики и газовой динамики двухфазных сред", Томск, 1971.

2. Определение основных аэродинамических характеристик, транспортируемых пневмоустановками. Материалы конференции "Механизация и автоматизация погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ в промышленности, Барнаул, 1971.

3. Влияние шероховатости частиц на коэффициент лобового сопротивления, Труды АПИ; выпуск 17, 1972.