

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЧЕК ПОТОКОМ ВОЗДУХА

Б. Ф. КАЛУГИН

(Представлено Заслуженным деятелем науки и техники проф. И. Н. Бутаковым)

Хотя целый ряд работ, как теоретических, так и экспериментальных, посвящен исследованию скоростей при пневматическом транспорте в горизонтальных трубах, но достаточной ясности в этом вопросе нет. В расчете средних скоростей по теоретическим формулам встречаются большие затруднения. Имеющийся в литературе экспериментальный материал касается средних скоростей и по существу не затрагивает вопроса изменения скорости по траектории движения частицы. В механизме взвешивания частичек в потоке воздуха также нет полной ясности. Неясным также остается вопрос, какие же причины вызывают дополнительные потери давления при пневматическом транспорте по сравнению с транспортировкой по тем же трубам чистого воздуха.

Для получения более ясной физической картины перемещения по трубам твердых частиц потоком воздуха на кафедре теплоэнергетических установок Томского политехнического института были проведены исследования с применением высокочастотной киносъемки. Для этой цели была смонтирована экспериментальная установка, показанная на рис. 1. Здесь же показано расположение осветителей и камеры при съемке.

Цифрой 1 обозначен высоконапорный вентилятор № 8, обеспечивающий напор до 450 мм водяного столба. Вентилятор присоединен к деревянной трубе прямоугольного сечения, расположенной горизонтально; две вертикальные стенки ее сделаны из стекла. Длина трубы 20 м, гидравлический радиус $R_h = 0,05$ м (в сечении — правильный квадрат). Расход воздуха изменялся с помощью задвижки 2. За задвижкой установлена спрямляющая решетка 3 для уменьшения влияния на поток возмущений на входе и более быстрого распределения потока по сечению трубы.

Средняя скорость воздуха замерялась пневмометрической трубкой 4 по общей методике замеров средних скоростей воздуха в трубах прямоугольного сечения. За пневмометрической трубкой расположено загрузочное устройство 6, представляющее из себя две стальные иглы, между которыми зажимался шар и которые быстро и одновременно разводились с помощью мощных пружин.

На расстоянии 11, 12 м от игл находится участок съемки 5. Предварительно были проведены опыты по определению длины разгонно-

го участка, где скорости движения частиц определялись с помощью фотоэлементов. Опыты показали, что уже на расстоянии 7—8 м от загрузочного устройства движение частиц можно считать установившимся.

По трубе пускались шары, выточенные из дерева, с удельным весом $\gamma = 727 \text{ кг/м}^3$. Диаметр шаров изменялся в пределах от 10 до 30 мм. Траектория шара фиксировалась высокочастотной киносъемочной камерой 9 СКС=1М, обеспечивающей съемку со скоростью до 4500 кадров в секунду.

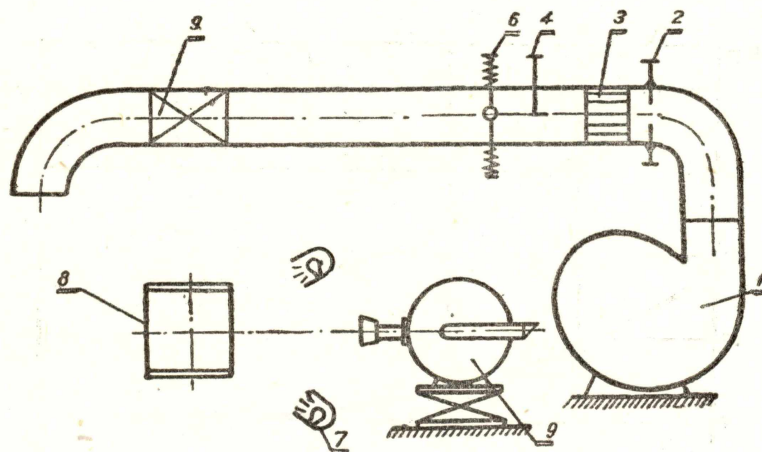


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Шар зажимался стальными иглами, включался вентилятор, задавался определенный напор, затем иглы разводились, и шар начинал свое движение в потоке воздуха. Одновременно с началом движения игл замыкалась цепь реле времени, которое через промежуточное реле включало киносъемочный аппарат. Освещение трубы производилось 18 фотолампами 7, мощностью по 500 вт каждая. С обратной стороны трубы, вплотную к стеклу, помещен экран из белой бумаги 8. Шары окрашивались в черный цвет. На пленке получалось изображение шара в виде белого пятна на черном фоне. Положение шара по высоте и длине трубы определялось с помощью специальных масштабных линеек, укрепленных на трубе. Кадры с пленки отпечатывались с увеличением на фотобумагу и затем через эпидиаскоп изображение подавалось на экран, где производились необходимые замеры. Время фиксировалось с помощью неоновой лампы, включенной в сеть переменного тока, подающей пучок света на пленку.

На рис. 2 представлен график изменения средних скоростей шаров в зависимости от отношения $\frac{d}{R_h}$, где d —диаметр шара. Каждая кривая построена при постоянной скорости потока воздуха для шаров одного и того же удельного веса. Такая система координат выбрана с целью сравнения данных опытов с опытами, опубликованными в работе Жихарева [1]. В этой работе [1] имеется зависимость $V_{\text{ср}} = f\left(\frac{d}{D}\right)$, где D —диаметр трубы, но диапазон изменения $\frac{d}{D}$ невелик—от 0,05 до 0,12. Зависимость у Жихарева выглядит в виде прямой линии. На графике (рис. 2) в малом диапазоне изменения $\frac{d}{R_h}$ зависимость также

близка к прямолинейной. Во всем же диапазоне $\frac{d}{R_h}$ видно, что V_{xcp} с ростом отношения $\frac{d}{R_h}$ убывает по кривой, асимптотически приближающейся к прямой, параллельной оси абсцисс. При $\frac{d}{R_h} < 0,65$ V_{xcp} меняется с изменением $\frac{d}{R_h}$, при $\frac{d}{R_h} > 0,65$ изменение V_{xcp} практически

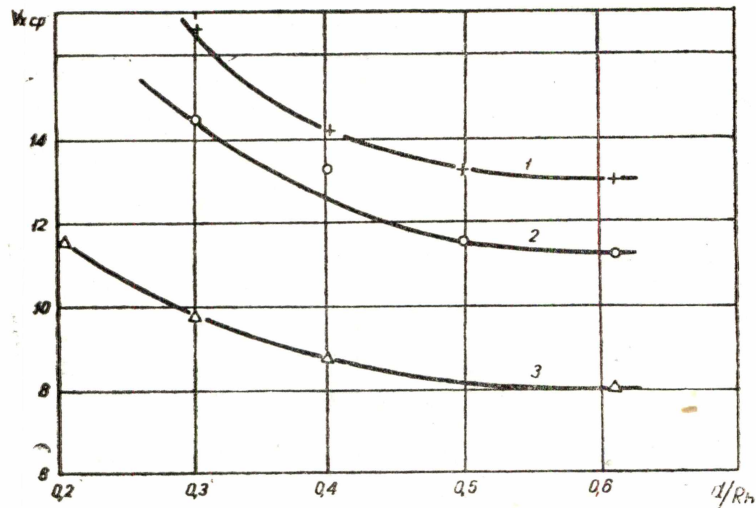


Рис. 2. Зависимость средней скорости частицы V_{xcp} от отношения диаметра ее к гидравлическому радиусу трубы (1— $U_{cp}=35$ м/сек; 2— $U_{cp}=32$ м/сек; 3— $U_{cp}=25,4$ м/сек).

ски отсутствует. Кривизна линий, изображенных на графике, уменьшается с уменьшением средней скорости потока воздуха.

На рис. 3 представлен график зависимости

$$\frac{W_{ncp} d_1}{W_{1cp} d_n} = \kappa \left(\frac{d_1}{d_n} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

где W_{ncp} —средняя относительная скорость шара, т. е. скорость, с которой движется шар по отношению к потоку воздуха, м/сек;

W_{1cp} —средняя относительная скорость шара, с которой сравниваются средние относительные скорости других шаров, м/сек;

d_1 —диаметр эталонного шара, м;

d_n —диаметр какого-то другого шара, имеющего скорость W_{ncp} м/сек, м;

κ —постоянная.

Диаметр эталонного шара $d_1=0,0304$. Средняя относительная скорость шара вычислялась по отношению к средней скорости потока воздуха:

$$W_{cp} = U_{cp} - V_{xcp}, \quad (2)$$

где U_{cp} —средняя скорость потока, м/сек.

Зависимость (1) получена путем подбора. Для разных скоростей воздуха все точки ложатся на прямую А. На этом же графике представлена прямая Г, построенная путем пересчета данных опытов Гастерштадта [2]. При этом в качестве эталона взят шар с диаметром 0,0202 м.

Шары имели удельные веса 3000 кг/м^3 , 2000 кг/м^3 и 1000 кг/м^3 . Скорость воздуха изменялась от $15,5 \text{ м/сек}$ до $40,3 \text{ м/сек}$. Все опытные точки укладываются на прямую Γ .

Прямые A и Γ не совпадают. Возможно, что это происходит из-за того, что здесь проявляются свойства материалов системы труба—шар. Как показывает киносъемка, шары перемещаются по трубе скачкообразно во всем диапазоне скоростей воздуха, при котором производилась съемка. При ударе могут проявляться свойства материалов шара и стенки. Возможно, что на положении прямой сказывается размер трубы, диаметр или гидравлический радиус.

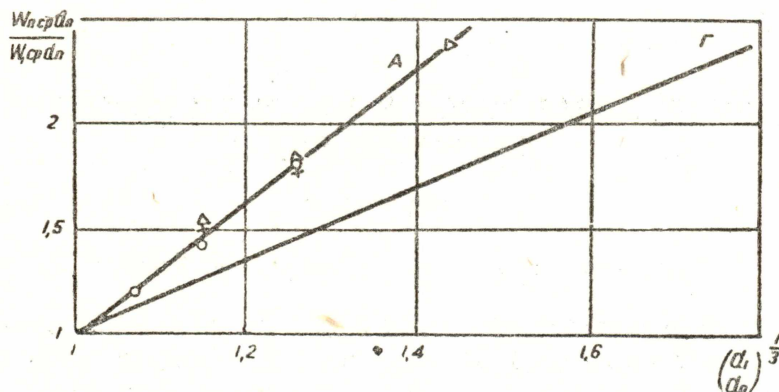


Рис. 3. Зависимость $\frac{W_{нсп} d_1}{W_{1сп} d_n} = f \left(\frac{d_1}{d_n} \right)^{\frac{1}{3}}$.

Прямая A : $+ U_{cp} = 35 \text{ м/сек}$; $0 - U_{cp} = 32 \text{ м/сек}$; $\Delta - U_{cp} = 25,4 \text{ м/сек}$.

Прямая Γ : диапазон изменения U_{cp} от $15,5 \text{ м/сек}$ до $40,3 \text{ м/сек}$.

Прямая A построена для трубы с $R_h = 0,05 \text{ м}$, труба и шары выполнены из дерева; прямая Γ —для стальной трубы $D = 0,089 \text{ м}$, а шары выполнены из железа пустотелыми.

Выводы

В результате проведенных экспериментов выявлено изменение средней скорости шара в широком диапазоне изменения отношения его диаметра к гидравлическому радиусу трубы. Путем подбора получена зависимость (1), характеризующая связь между относительными скоростями шаров одного и того же удельного веса и их диаметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жихарев Е. А. Экспериментальное исследование характера движения частиц в трубопроводах пневматического транспорта. Инженерно-физический журнал, № 2, 1959.
2. Гастерштадт. Пневматический транспорт. Изд. ВСНХ, 1927.