

$$= \frac{0,5674 \cdot 3408 (25,6 \cdot 10^{-6})^{0,64} 3,527 \cdot 10^{-3}}{0,395 \cdot 0,0328 (2,37 \cdot 10^{-3})^{0,64} 0,7^{1/3} 5298,6 v^{0,64}} \ln \frac{120-20}{80-60} =$$

$$= \frac{2,465}{v^{0,64}}.$$

В зависимости от скорости движения воздуха v определяем τ . Из графика на рис. 1 видно, что наиболее приемлемы значения v в пределах 2—4 м/с.

Скорость воздуха, получаемая как частное от деления общей подачи воздуха в насыпь зерна на площадь, занимаемую насыпью, должна быть в пределах 0,8—1,6 м/с, что с учетом порозности слоя обеспечит скорость обтекания зерна воздухом в пределах 2—4 м/с. С учетом же квадратичной зависимости аэродинамического сопротивления слоя от скорости движения воздуха указанные значения последней будут оптимальными также с точки зрения энергозатрат на их обеспечение.

Список литературы

1. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М., 1985.
2. Мельник Б.Е. Активное вентилирование зерна. М., 1986.
3. Азров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л., 1979.

УДК 621.547

Б.М.ХРУСТАЛЕВ, А.И.МОЖАР

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ СИСТЕМ ПНЕВМОТРАНСПОРТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ

Одной из основных задач во многих отраслях народного хозяйства является дальнейшее развитие пневмотранспорта различных материалов (зерна, торфа, опилок, полимеров и др.).

Так как эффективность использования энергии несущей среды зависит от формы поперечного сечения трубопровода [1], разработка и исследование новых форм поперечных сечений трубопроводов является актуальной задачей. Ниже рассматривается одна из основных характеристик движения однородной среды по трубопроводам — распределение скоростей в сечении типа "сегмент".

Турбулентное течение однородной среды в трубопроводах наиболее часто наблюдается на практике. Изучению законов турбулентного движения жидкости или газа посвящены многочисленные исследования [1—6]. В то же время механизм турбулентности потока и его математическое описание до сих пор представляет собой нерешенную задачу. Анализ соответствующих скоростных полей и концентраций основан на эмпирических гипотезах, связывающих силы кажущейся вязкости жидкости при турбулентном перемешивании с осредненными во времени скоростями.

Согласно гипотезе Буссинеска [5], турбулентное кажущееся касатель-

ное напряжение τ_t подчиняется закону, аналогичному закону трения Ньютона:

$$\tau_t = \rho \epsilon \frac{dv}{dy}, \quad (1)$$

где $\epsilon = A_T/\rho$ — коэффициент кинематической кажущейся вязкости жидкости; A_T — коэффициент турбулентного обмена; ρ — плотность жидкости; dv/dy — градиент скорости жидкости по координате y .

Имеется ряд гипотез о связи между коэффициентом кажущейся вязкости и полем осредненных скоростей в уравнении (1) [2]. В теории Прандтля эта связь представлена в виде зависимости

$$\epsilon = l^2 \left| \frac{dv}{dy} \right|, \quad (2)$$

где l — длина пути перемешивания.

На основании выражений (1) и (2) получен универсальный закон распределения скоростей в канале с плоскими стенками [5], который с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть распространен на трубопроводы с круглым поперечным сечением:

$$(v_0 - v)/v_0 = -(1/\alpha) \ln(1 - \sqrt{1 - y/R} + \sqrt{1 + y/R}), \quad (3)$$

где v_0 — скорость жидкости на оси потока; R — радиус трубы; α — эмпирический коэффициент.

Однако формула (3) редко применяется в практических расчетах из-за некоторых трудностей определения входящего в нее эмпирического коэффициента.

Некоторые исследователи полагают распределение скоростей подчиняющимся степенному закону [2, 6, 7]. Наибольшее распространение получила формула, предложенная в работе [5]:

$$v/v_0 = (y/R)^{1/n}. \quad (4)$$

Формула (4) проста и удобна в применении. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными данными. Показатель степени n находится в пределах 6—10 при изменении числа Re от 10^3 до $3 \cdot 10^6$, а также зависит от шероховатости стенок трубы.

Выражение (4) не дает прямой связи законов сопротивления и распределения скоростей жидкости при ее движении по трубопроводу. Однако эта связь неявно выражается через показатель степени n . В [2, 5] даны некоторые теоретические предпосылки к определению n . В [8] получено

$$1/n = 0,84\sqrt{\lambda}. \quad (5)$$

Из (5) можно получить зависимость показателя степени от режима движения потока

$$1/n = 0,56/Re^{0,125}. \quad (6)$$

Для трубопроводов круглого поперечного сечения с любой шероховатостью стенок при стабилизированном течении в квадратичной области показатель степени n с учетом данных, приведенных в [9], можно определить по формуле

$$1/n = 0,467 / \lg(8,3/\bar{\Delta}),$$

где $\bar{\Delta}$ — относительная шероховатость стенок трубы.

Экспериментальными исследованиями установлено, что распределение скоростей в трубопроводах с поперечным сечением типа "сегмент" подчиняется степенному закону (4). Значения n при этом изменяются от 5,0 до 8,4 при $Re = \text{const}$. Полученный результат подтверждает указанную в [7] воз-

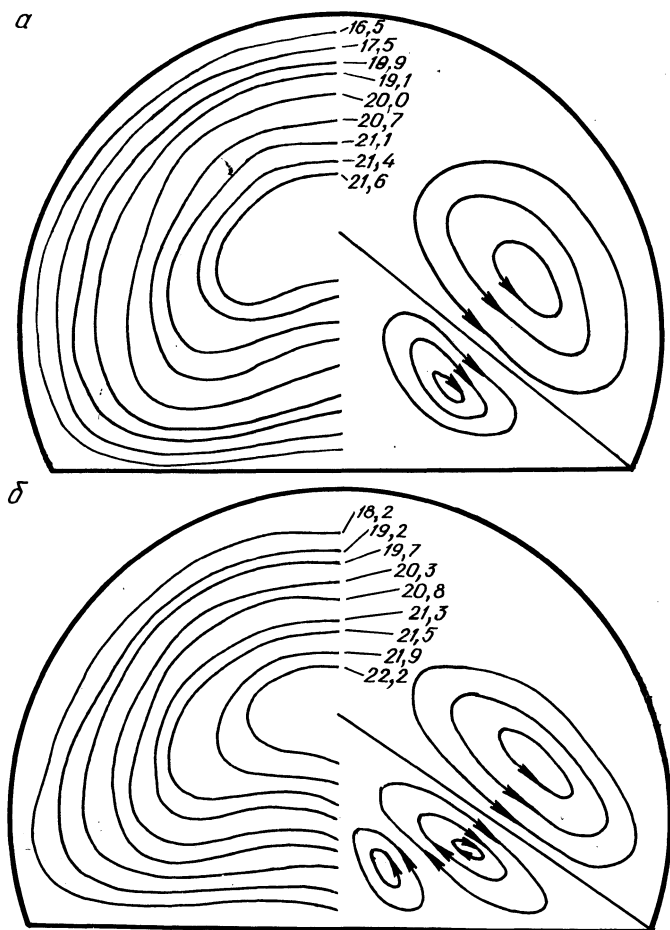


Рис. 1. Изоахи скоростей несущей среды и схемы вторичных течений в трубопроводе типа "сегмент":
а — $\varphi = 135^\circ$; б — $\varphi = 160^\circ$

возможность применения этого закона для описания распределения скоростей жидкости в трубопроводах с поперечным сечением треугольной, прямоугольной, квадратной, звездообразной форм, круглой с выемкой. Значение n , вычисленное по (6), отличается от экспериментального на 13 %.

Анализ эпюр распределения скоростей жидкости в поперечных сечениях типа "сегмент" и круглых свидетельствует о различии скоростных структур потока. Это связано, по-видимому, с характером механизма формирования, отрыва и распределения вихрей на границах потока. Возникающие в угловых зонах поперечных сечений трубопроводов вторичные течения [7] обуславливают деформацию поля скоростей по биссектрисам углов и в окрестностях прилегающих участков стенок и дна трубы. Вторичные течения в трубопроводах некруглой формы и на участках стабилизации потока в круглых трубопроводах изучены недостаточно. Имеется множество толкований физической сущности явлений, порождающих вторичные течения в несущей среде [10].

Из анализа рис. 1 следует, что увеличение размеров плоского дна трубопровода приводит к формированию второй пары вихрей у вертикальной оси сечения. Это является причиной заметного отличия эпюры осевых скоростей в трубопроводах с поперечным сечением типа "сегмент" (рис. 1, б). Возникающие в нижней части трубы вихри подтормаживают основной поток в этой зоне. Таким образом, несимметричное в вертикальной плоскости распределение осредненных скоростей несущей среды является фактором, определяющим характер движения частиц материала в дисперсном потоке. Распределение скоростей зависит от сопротивления трубопровода. Для трубопроводов некруглого сечения в [7] коэффициент сопротивления отнесен к гидравлическому диаметру трубы: $D_r = 4A/P$ (A, P — соответственно площадь и периметр поперечного сечения трубы). В общем случае коэффициент гидравлического сопротивления трубопроводов определяют с учетом поправочного коэффициента k_ϕ , учитывающего форму их поперечного сечения [2]. Для трубопроводов с поперечным сечением, близким к кругу, для всех режимов движения можно принимать $k_\phi = 1,0$, а значение λ определять с учетом гидравлического диаметра трубы.

Обработка экспериментальных данных [10, 11, 7, 5] позволила установить, что сопротивление труб с разными поперечными сечениями (в том числе типа "сегмент") подчиняется единому закону (рис. 2). Это позволяет учитывать в трубопроводах с сечением типа "сегмент" потери давления несущей среды с помощью геометрического коэффициента формы

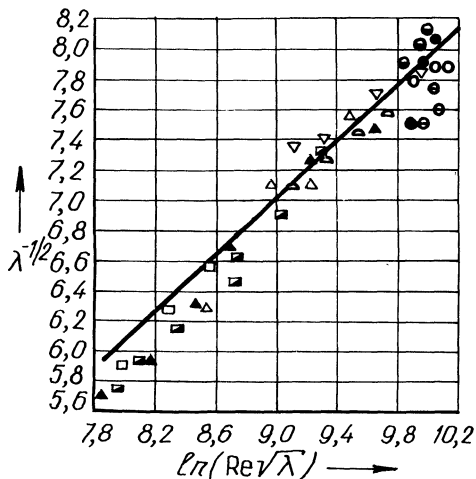
$$\Phi = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\pi}{360} (360 - \varphi) + \sin \frac{\varphi}{2} \right)$$

(φ — характеристика поперечного сечения типа "сегмент"). Это выражение получено из произведения отношений геометрических и гидравлических диаметров поперечных сечений типа "сегмент" и круглого при $A = \text{const}$.

Коэффициент Φ характеризует изменение потерь давления вследствие трения при движении несущей среды в зависимости от конфигурации сечения трубы.

Рис. 2. Коэффициент сопротивления трубопроводов:

Δ — с поперечным сечением треугольной формы [9]; ▲ — треугольной [5]; □ — квадратной [13]; ■ — прямоугольной [12]; ○ — полукруглой [4]; ▽ — полу-
 овальной [11]; ◊ — $\varphi = 75^\circ$; ● — $\varphi = 105^\circ$; ◐ — $\varphi = 135^\circ$; ◑ — $\varphi = 160^\circ$



Потери давления при перемещении "чистой" несущей среды по трубопроводам с поперечным сечением типа "сегмент"

$$\rho_B^f = \rho_B \phi^{-1},$$

где ρ_B — потери давления при движении воздуха в круглом трубопроводе при $A = A_f$.

Установлено, что трубопроводы с поперечным сечением типа "сегмент" экономически целесообразны при $l_f/l_o \geq 0,7$ (l_f, l_o — соответственно длина горизонтальных участков и общая длина трассы). При этом энергоемкость систем пневмотранспорта снижается на 10—15%.

Список литературы

1. Проблемы турбулентности / Под ред. А.В.Великанова, Н.Т.Швейковского. М.; Л. 1936.
2. Гольдина В.Д., Шваб В.А. Исследование равномерного турбулентного движения несжимаемой жидкости в открытых каналах с различной формой поперечного сечения // Методы аэродинамики и теплообмена в технологических процессах. Томск, 1984.
3. Пустовойт Б.В. Механика движения жидкостей в трубах. Л., 1980.
4. Хинце И.О. Турбулентность. М., 1963.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Пер. с нем. Г.Вольперта; Под ред. Л.Г. Лойнянского. М., 1974.
6. Шевелев Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. М., 1953.
7. Шиллер Л. Движение жидкостей в трубах / Пер. с нем. Г.Вольперта. М.; Л., 1936.
8. Альтшуль А.Д., Колицун В.И. Гидравлические сопротивления трубопроводов. М., 1964.
9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., 1975.
10. Розунович В.П. Исследование трехмерного поля осредненных скоростей в однородных по длине потоках: Дис. ... канд. техн. наук. Мн., 1971.
11. Кеммер А.С., Котюба В.В. Гидравлические сопротивления труб некруглого поперечного сечения при движении чистого воздуха // Тр. Алтайск. политехн. ин-та. 1972. Вып. 17.
12. Линартас И.-Б.В. Исследование пневматического транспортирования фрезерного торфа по горизонтальным трубопроводам разной формы поперечного сечения: Дис. ... канд. техн. наук. Каунас, 1971.
13. Миллионщиков М.Д. Турбулентные течения в пограничном слое и в трубах. М., 1969.