

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ
ГАЗООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ
ГАЗООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Лабораторные работы по курсу
«Типовые машины и оборудование»
для бакалавров по направлению 150400
«Технологические машины и оборудование»



Тамбов
Издательство ТГТУ
2005

УДК 66.021.1
ББК К724я73-5
Т38

Утверждено Редакционно-издательским советом университета

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент
Е.В. Хабарова

Авторы-составители:

Т38 Технологическое оборудование для переработки газообразных материалов: Лабораторные работы / Авт.-сост.: А.Г. Ткачев, З.А. Михалева, А.А. Баранов, В.Л. Негров. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2005. 32 с.

Даны лабораторные работы по изучению технологического оборудования для переработки газообразных материалов.

Предназначены для бакалавров по направлению 150400.

УДК 66.021.1
ББК К724я73-5

© Тамбовский государственный
технический университет (ТГТУ), 2005

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ГАЗООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лабораторные работы

Авторы-составители:

ТКАЧЕВ Алексей Григорьевич,
МИХАЛЕВА Зоя Алексеевна,
БАРАНОВ Андрей Алексеевич,
НЕГРОВ Владимир Леонидович

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 01.12.2005.

Формат 60 × 84/16. Бумага газетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,85 уч.-изд. л.

Тираж 50 экз. С. 814

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЫЛЕЙ

Цель работы: изучить методики экспериментального определения плотностей порошкообразных и пылеобразных веществ.

Оборудование и материалы: мерный цилиндр, аналитические весы, навеска пыли, пикнометр, вакуум-насос, термометр.

Теоретические положения

Одной из важнейших характеристик пылей и порошкообразных веществ, без которых нельзя считать технологический или газоочистной аппарат, является плотность. Она нужна для определения скорости витания частиц, емкости бункеров пылеуловителей и т.д. Плотность пыли – это масса единицы ее объема. Различают истинную и насыпную плотность. Истинная плотность – это плотность твердого материала пыли. Насыпная плотность – масса пыли в единице объема ею заполненном. Некоторые параметры промышленных пылей представлены в табл. 1.

1 Плотности некоторых веществ

Материал	Истинная плотность, кг/м ³	Насыпная плотность, кг/м ³
Графитная пыль	1900...2300	1200
Асбестовая пыль	2100...2800	600
Доменная пыль	3100	860

Плотность твердого тела легко определяется взвешиванием единицы его объема. Если точный объем тела определить затруднительно, его плотность определяют гидравлическим взвешиванием. Тело, плотность которого необходимо определить, подвешивают на тонкой нити к одной из чашек точных весов. И определяют его массу M_1 в воздухе и при полном погружении в емкость с водой M_2 . Разность масс $M_1 - M_2$ равняется массе вытесненной воды $M_1 - M_2 = V_T \rho_B$, откуда объем твердого тела $V_T = \frac{M_1 - M_2}{\rho_B}$, где

ρ_B – плотность воды. Тогда плотность тела $\rho_T = \frac{M_1}{V_T} = \frac{M_1 \rho_B}{M_1 - M_2}$.

Определение истинной плотности пыли связано с некоторыми трудностями, основной из которых является учет промежутков между частицами пыли, а также пористость самих частиц. Истинную плотность порошкообразных материалов обычно определяют с помощью пикнометра. Метод заключается в определении объема жидкости, вытесненной порошком, масса которого известна. Частное от деления массы материала на вытесненный им объем есть истинная плотность. Жидкость, используемая для определения истинной плотности $\rho_{ж}$, не должна взаимодействовать с пылью. Если такой жидкости нет, то можно применить метод, основанный на законе Бойля-Мариотта, согласно которому при $T = \text{const}$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$. Если в герметичный сосуд при постоянной температуре поместить определенное количество пыли, то давление в нем увеличится. По изменению давления можно определить объем пыли и, зная ее массу, рассчитать истинную плотность. Расчетную схему в данном случае можно представить следующим образом:

Добавили пыль → Определили p_2 →

$$V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2} \rightarrow V_n = V_1 - V_2 \rightarrow \rho_n = \frac{m}{V_n}.$$

На рис. 1 представлены схемы экспериментальных установок по определению насыпной и истинной плотности.

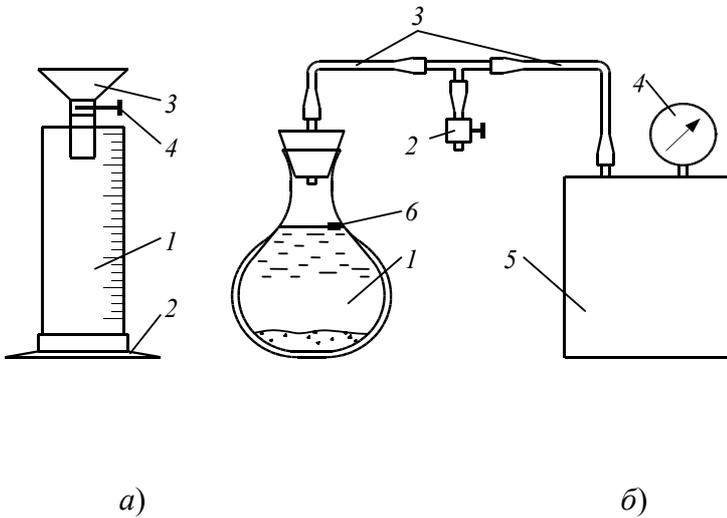


Рис. 1 Схемы экспериментальных установок:
а – насыпная плотность: 1 – мерный цилиндр; 2 – основание;
3 – бункер; 4 – задвижка;
б – истинная плотность: 1 – пикнометр; 2 – зажим; 3 – шланги;
4 – вакуумметр; 5 – вакуумный насос; 6 – калибровочная метка

Порядок определения насыпной плотности

- 1 На весах определяют массу мерного цилиндра (M_1).
- 2 Заполняют бункер пылью.
- 3 Открыв задвижку, заполняют цилиндр пылью.
- 4 Пыль выше верхней крышки цилиндра удаляют картонкой.
- 5 Взвешиванием определяют массу цилиндра с пылью (M_2).
- 6 Рассчитывают насыпную плотность $\rho_n = \frac{M_2 - M_1}{V}$, где V – объем мерного цилиндра.
- 7 Эксперимент повторяют шесть раз для разных проб пыли.
- 8 Рассчитывают среднюю насыпную плотность.

Порядок определения истинной плотности

- 1 Подготавливают пикнометрическую жидкость (вода, выдержанная в термостатированном помещении, см. табл. 2).
- 2 Взвешивают пикнометр (M_1).
- 3 Засыпав в пикнометр пыль, определяют его массу с пылью (M_2).
- 4 В пикнометр с пылью наливают пикнометрическую жидкость так, чтобы пыль была полностью покрыта жидкостью, и взбалтывают содержимое пикнометра до полного смачивания пыли жидкостью.
- 5 Пикнометр соединяют с вакуум-насосом и включают его, добиваясь легкого «кипения» жидкости, при котором удаляются пузырьки воздуха. Процесс ведут до прекращения «кипения».
- 6 Отключают пикнометр и доливают пикнометрическую жидкость до калибровочной метки. Определяют массу пикнометра с пылью и жидкостью (M_3).
- 7 Удаляют из пикнометра жидкость и пыль, промывают сосуд.

- 8 Заливают в пикнометр жидкость до калибровочной метки и взвешивают (M_4).
- 9 Рассчитывают уточненный объем пикнометра $V_{\text{пик}} = (M_4 - M_1) / \rho_{\text{ж}}$, где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность пикнометрической жидкости при температуре в условиях эксперимента.
- 10 Рассчитывают массу пыли в пикнометре $M_{\text{п}} = M_2 - M_1$.
- 11 Определяют массу пикнометрической жидкости $M_{\text{ж}} = M_3 - M_2$.
- 12 Определяют объем, занимаемый жидкостью $V_{\text{ж}} = M_{\text{ж}} / \rho_{\text{ж}}$.
- 13 Рассчитывают объем пыли, помещенной в пикнометр, $V_{\text{п}} = V_{\text{пик}} - V_{\text{ж}}$.
- 14 Определяют истинную плотность $\rho_{\text{п}} = M_{\text{п}} / V_{\text{п}}$.

2 Плотность воды в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{г/см}^3$						
0	0,99987	9	0,99981	18	0,99862	27	0,99654
1	0,99993	10	0,99973	19	0,99843	28	0,99626
2	0,99997	11	0,99963	20	0,99823	29	0,99597
3	0,99999	12	0,99952	21	0,99802	30	0,99567
4	1,00000	13	0,99940	22	0,99780	31	0,99537
5	0,99999	14	0,99927	23	0,99757	32	0,99505
6	0,99997	15	0,99913	24	0,99732	33	0,99472
7	0,99993	16	0,99897	25	0,99707	34	0,99440
8	0,99988	17	0,99880	26	0,99681		

Контрольные вопросы

- 1 Какие различают виды плотностей пыли и порошкообразных веществ?
- 2 Как определяется истинная плотность частиц пикнометрическим методом?
- 3 Как определяется насыпная плотность пылеобразных материалов?
- 4 Описание экспериментальных установок.
- 5 Последовательность обработки результатов при определении истинной и насыпной плотности.
- 6 Назначение вакуумирования и термостатирования при определении истинной плотности.
- 7 Суть метода определения истинной плотности на основе закона Бойля-Мариотта.
- 8 Методика определения плотности твердых тел сложной формы.

Лабораторная работа 2

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИХ ТРУБОК, РЕГИСТРИРУЮЩИХ ПНЕВМОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ С ИХ ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

Цель работы: изучить конструкции и принцип действия скоростных трубок и трубки Вентури; овладеть навыками измерения перепадов давления с помощью приборов с видимым уровнем; закрепить теоретические знания основных законов аэродинамики.

Оборудование и материалы: пневмометрические трубки статического, полного и динамического давлений; двухтрубный U-образный прибор, микроанометр многопредельный с наклонной трубкой ММН-240.

Теоретические положения

Для контроля технологического и газоочистного оборудования необходимо знать скорость движения и расход газа, перепады давления и коэффициенты сопротивления в элементах оборудования. Наибольшее распространение для измерения параметров газовых потоков получили пневмометрические приборы, принцип действия которых основан на уравнении Бернулли.

При набегающем потоке на неподвижное тело в некоторой его точке происходит разветвление потока (рис. 2). Данная точка называется точкой торможения или критической точкой. Скорость в критической точке равна нулю.

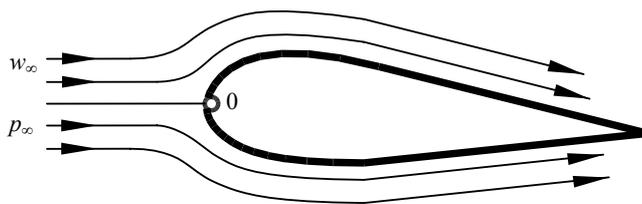


Рис. 2 Картина обтекания тела потоком газа

Давление в точке торможения можно определить из уравнения Бернулли:

$$p_0 + \frac{\rho w_0^2}{2} = p_\infty + \frac{\rho w_\infty^2}{2},$$

где p_0 , w_0 – давление и скорость потока в точке торможения; p_∞ , w_∞ – давление и скорость потока на значительном расстоянии от точки торможения; ρ – плотность потока.

Так как скорость в точке торможения $w_0 = 0$, то давление в точке торможения

$$p_0 = p_\infty + \frac{\rho w_\infty^2}{2}.$$

Давление в точке торможения потока равно сумме статического и динамического давлений в потоке. Эту сумму называют полным давлением. Для расчетов обычно используют не абсолютное значение давления в точке, а разность между давлением в точке и статическим давлением в потоке, которое является динамическим давлением, –

$$\Delta p = p_0 - p_\infty = \frac{\rho w_\infty^2}{2}.$$

С помощью пневмометрических приборов непосредственно определяют давление, а скорость рассчитывают из уравнения Бернулли. Для определения скорости используются пневмометрические трубки, которые разделяют на трубки полного, статического и динамического давления (рис. 3).

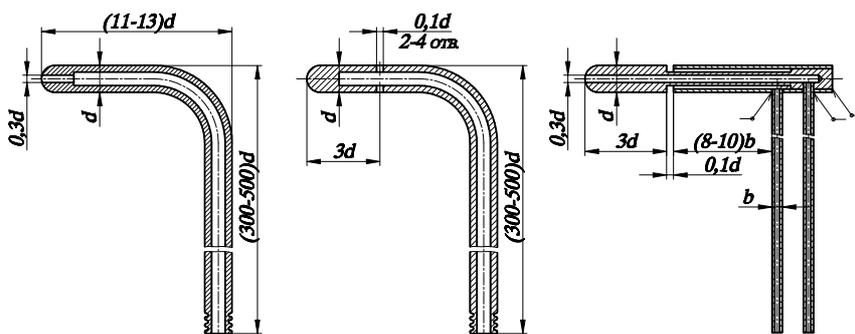


Рис. 3 Конструкции пневмометрических трубок

Трубка полного давления воспринимает давление в точке торможения, которой является носок трубки, направленный в режиме измерений навстречу потоку.

Трубка статического давления не восприимчива к динамической составляющей давления в потоке, так как скорость потока на поверхности тела, в которой расположены приемные отверстия, равна нулю.

Скоростная трубка Пито-Прандтля имеет два приемных отверстия. Отверстие на носке трубки воспринимает полное давление в потоке, а отверстие, расположенное на образующей цилиндра трубки, – статическое. Их разница, замеренная регистрирующим прибором, дает динамическую составляющую давления, по которой легко рассчитать скорость потока в «точке» измерения.

Наряду со скоростными трубками для измерения скорости потока применяют трубку Вентури (рис. 4).

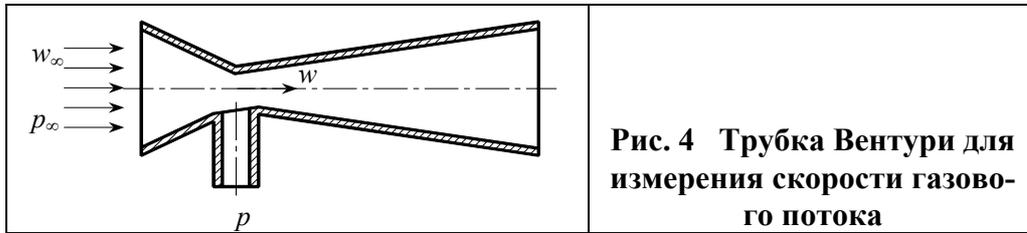


Рис. 4 Трубка Вентури для измерения скорости газового потока

С помощью резинового шланга давление p в сжатом сечении подается на регистрирующий прибор, воспринимающий разность между p_∞ и p . Для входного и сжатого сечения уравнение Бернулли можно представить следующим образом:

$$p_\infty + \frac{\rho w_\infty^2}{2} = p + \frac{\rho w^2}{2}, \quad \text{откуда} \quad p_\infty - p = \frac{\rho w_\infty^2}{2} \left(\frac{w^2}{w_\infty^2} - 1 \right).$$

Отношение w/w_∞ можно выразить через отношение площадей во входном и сжатом сечении трубки Вентури из уравнения расхода:

$$w_\infty F_\infty = wF, \quad \frac{w}{w_\infty} = \frac{F_\infty}{F}.$$

Следовательно,

$$\Delta p = p_\infty - p = \frac{\rho w_\infty^2}{2} \left[\left(\frac{F_\infty}{F} \right)^2 - 1 \right].$$

Так как $\Delta p = p_\infty - p = \rho_{\text{ж}} gH$, где H – высота столба жидкости с плотностью $\rho_{\text{ж}}$ в регистрирующем приборе, то для скорости в набегающем потоке получается выражение

$$w_\infty = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ж}}gH}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F_\infty}{F} \right)^2 - 1}},$$

или с учетом поправочного коэффициента трубки Вентури

$$w_\infty = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ж}}gH}{\rho}} \frac{K}{\sqrt{\left(\frac{F_\infty}{F} \right)^2 - 1}}.$$

Для регистрации давлений газа, воспринимаемых скоростными трубками, используются различные устройства. Наиболее простыми являются U-образные приборы. На рис. 5 представлены схемы замеров полного

(рис. 5, а) и динамического давления (рис. 5, б) с помощью U-образной трубки.

Вместо способа, указанного на рис. 5, б с двумя трубками, можно использовать схему, когда в магистраль вводится скоростная трубка Пито-Прандтля, воспринимающая и полное, и статическое давление. Зная полное давление в данной точке и статическое (рис. 5, б), можно вычислить динамическое давление и скорость в точке замера:

$$\frac{\rho_c w^2}{2} = \Delta p = p - p_\infty = \rho_{\text{ж}} gH; \quad w = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{ж}}gH}{\rho_c}}.$$

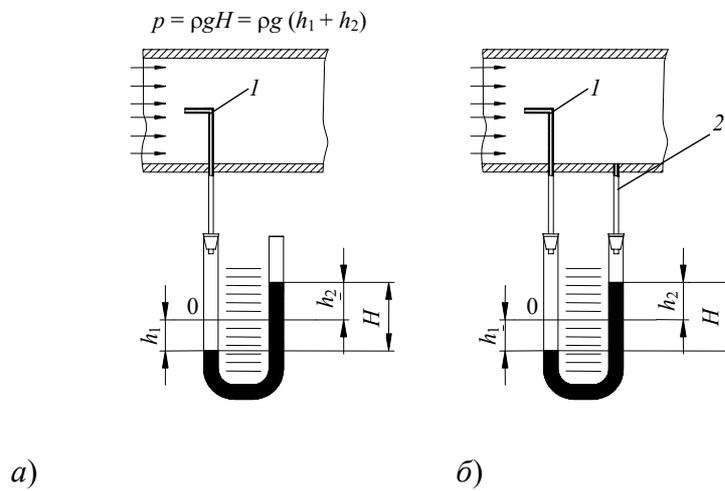


Рис. 1.5 Схемы замера полного а) и динамического давлений б):
 1 – трубка полного давления; 2 – трубка статического давления

Практически нельзя совместить в одной точке приемники и полного и статического давлений (будь то скоростная трубка или схема замера как на рис. 5, б), поэтому в формулу вводится поправочный коэффициент, который для хороших трубок всего на 1...2 % отличается от единицы, –

$$w = k \sqrt{\frac{2\rho_{ж}gH}{\rho_c}}$$

Универсальным пневмометрическим прибором для измерения давлений в широком диапазоне и особенно при малых давлениях является многопредельный микроманометр с наклонной трубкой (рис. 6).

На плите микроманометра укреплен резервуар, герметически закрытый крышкой. На крышке расположен трехходовой кран, отверстие с пробкой для заливки и регулятор нулевого положения мениска спирта в измерительной трубке, соединенной с резервуаром. Измерительная трубка снабжена защитным кожухом и соединена верхним концом с помощью соединительного шланга с трехходовым краном. Для установки измерительной трубки на требуемый угол к плите прикреплена дуга с пятью отверстиями, соответствующими определенным значениям постоянной прибора K . Для установки микроманометра в горизонтальное положение при замерах на плите установлено два уровня с цилиндрическими ампулами. Прибор приводится в горизонтальное положение двумя регулировочными ножками.

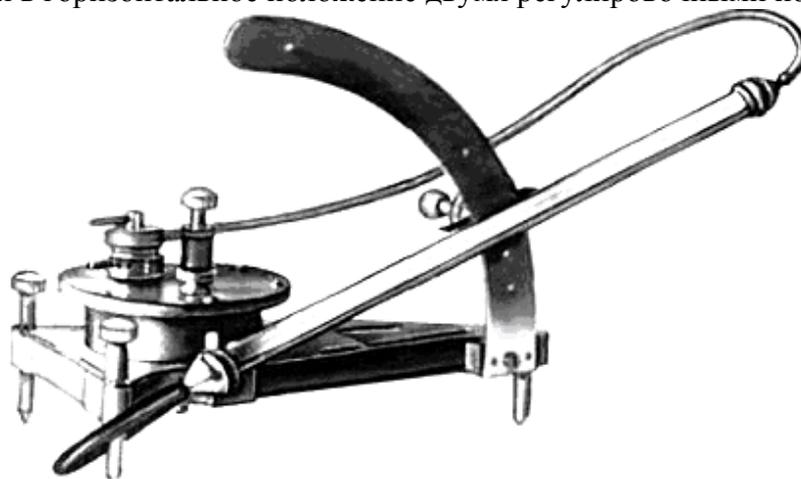


Рис. 6 Микроманометр типа ММН-240

Трехходовой кран имеет три штуцера. Один используется для постоянного соединения крана с из-

мерительной трубкой. При измерении избыточного давления резиновая трубка, идущая от места замера, надевается на штуцер со знаком «плюс», а при измерении вакуумметрического давления на штуцер со знаком «минус». При измерении разности давлений регистратор большего соединяется со штуцером «плюс», а меньшего – со штуцером «минус».

Принцип действия прибора основан на том, что измеряемое давление газа (или разность давлений) уравнивается давлением столба рабочей жидкости, который образуется в наклонной трубке (к трубке подводится меньшее давление). При этом условии уровень спирта в измерительной трубке будет повышаться, а в резервуаре – понижаться.

Основные составные части многопредельного микроманометра показаны на рис. 7. Цилиндрический резервуар 2 прибора неподвижно установлен на плите 1. На крышке 3 резервуара имеется трехходовой кран 4 для присоединения прибора к пневмометрической трубке. При замера отвод трубки, воспринимающий полное давление, подсоединяется к патрубку манометра со знаком плюс, а отвод трубки, воспринимающий статическое давление, к патрубку со знаком минус. Приведя указатель крана манометра в нулевое положение, устанавливают нулевой уровень жидкости в измерительной трубке микроманометра. Для этой цели служит регулятор 6 на крышке резервуара. Через отверстие 5 в резервуар микроманометра заливают рабочую жидкость – этиловый спирт.

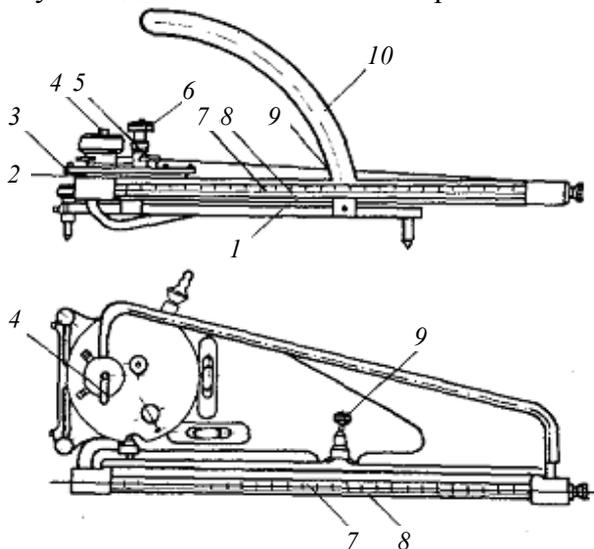


Рис. 7 Схема и основные узлы микроманометра типа ММН

Стеклянная измерительная трубка 7 со шкалой от 0...250 мм, полузакрытая металлическим чехлом 8 от повреждений, соединена с резервуаром. Она может устанавливаться под различными углами наклона к горизонтальной плоскости с помощью фиксатора 9 на стойке 10 с пятью отверстиями. Цифры у отверстий стойки представляют собой синус угла наклона измерительной трубки прибора и определяют численно соответствующие значения поправочного коэффициента микроманометра. Микроманометр типа ММН установлен на трех ножках, одна из которых фиксированной высоты, а две другие – винтовые. На плите прибора размещены также два уровнемера.

Истинное значение измеряемого давления или перепада давления определяется зависимостью

$$\Delta p = 9,81HK ,$$

где H – видимая длина столба спирта в измерительной трубке; K – постоянная прибора, значения которой указаны на дуге с отверстиями.

Порядок выполнения работы

- 1 Изучить конструкцию скоростной трубки Пито-Прандтля.
- 2 Определить по каким отводам передается полное и статическое давление на регистрирующий прибор.
- 3 Изучить конструкцию многопредельного микроманометра ММН-240.

- 4 С помощью регулировочных ножек выставить микроманометр в горизонтальное положение, контролируя действия по двум уровням.
- 5 Установить наклонную трубку в положение, отвечающее коэффициенту $K = 0,8$.
- 6 Выставить нулевое положение уровня жидкости в наклонной трубке с помощью регулятора на крышке микроманометра.
- 7 Подготовить прибор к измерениям, подключив резиновыми шлангами скоростную трубку к патрубкам микроманометра.

Контрольные вопросы

- 1 Уравнение Бернулли. Теоретические основы пневмометрических измерений параметров пылегазовых потоков.
- 2 Давление в потоке. Полное, статическое и динамическое давление.
- 3 Конструкции пневмометрических трубок для измерения полного, статического и динамического давлений.
- 4 Теоретические основы измерения скорости с помощью трубки Вентури.
- 5 Схемы измерения давления и скорости в газовом потоке.
- 6 Принцип действия многопредельного микроманометра.
- 7 Возможность и назначение поворота измерительной трубки микроманометра.
- 8 Порядок подготовки к измерениям с помощью микроманометра и скоростной трубки Пито-Прандтля.

Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ПОДВОДЯЩИХ МАГИСТРАЛЯХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

Цель работы: освоить методику определения поля скоростей и среднего расхода газа в трубопроводах и исследовать поле скоростей при движении газового потока по газопроводу круглого сечения.

Оборудование и материалы: газопровод, скоростная трубка Пито-Прандтля, многопредельный микроманометр ММН-240.

Теоретические положения

Для контроля работы технологических установок следует знать объемный расход газов, проходящих по газопроводу; обычно его определяют, замеряя скорость движения газов. При этом с помощью пневмометрической трубки и микроманометра замеряют динамическое давление газового потока и рассчитывают скорость движения его в точке замера:

$$w_r = \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}}{\rho_r}}, \text{ м/с,}$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамическое давление газового потока в точке замера, Па; ρ_r – плотность газа в рабочих условиях, кг/м³.

Скорость движения газов как при ламинарном, так и при турбулентном режимах неодинакова в разных точках сечения газопровода. Кроме того, под действием различных факторов могут возникать дополнительные возмущения, увеличивающие неравномерность распределения скоростей газа по сечению. Поэтому скорость газового потока, замеренная с помощью пневмометрической трубки и микроманометра, является скоростью, характеризующей конкретную точку сечения газопровода.

Для нахождения средней скорости движения потока или изучения распределения скоростей по сечению газопровода снимают так называемое поле скоростей. Для этого, если газопровод имеет прямоугольное сечение, его условно разбивают на ряд прямоугольников, геометрически подобных сечению, и измерения производят в центрах полученных прямоугольников (рис. 8, а).

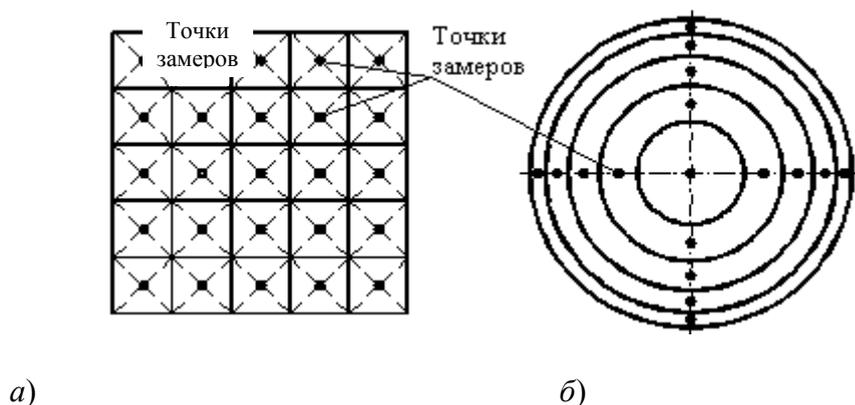


Рис. 8 Схема расположения точек замера скоростей по сечению газопровода:

а – прямоугольного сечения; б – круглого сечения

Длина стороны условного прямоугольника не должна превышать 0,15...0,20 м; минимальное число точек замера – три в каждом направлении. В процессе подготовки к замерам на двух взаимно перпендикулярных сторонах газопровода по осям, на которых расположены центры условных прямоугольников, прорезают отверстия диаметром 0,03...0,05 м и приваривают в этих местах короткие штуцеры из отрезков труб.

Газопроводы круглого сечения разбивают на ряд концентрических равновеликих колец и измерения производят по двум взаимно перпендикулярным диаметрам (рис. 8, б), для чего в стенке газопровода на расстоянии, равном четверти окружности его сечения, прорезают два отверстия диаметром 0,03...0,05 м и приваривают короткие штуцеры.

Достаточно надежные результаты замеров могут быть получены, если газопроводы круглого сечения будут разбиты на следующее число колец:

Диаметр газопровода, м	0,2	0,2...0,4	0,4...0,6	0,6...0,8	0,8...1,0	> 1,0
Число колец	3	4	5	6	8	10

Расстояние от центра газопровода до точки замера определяется по формуле

$$l_i = R\sqrt{(2i-1)/2n}, \text{ м,}$$

где R – радиус газопровода, м; n – число колец, на которые разделено сечение газопровода; i – порядковый номер кольца, считая от центра газопровода.

В практических целях удобно пользоваться величиной расстояния от внутренней стенки газопровода в месте ввода заборной трубки до точки замера. Указанные расстояния определяют по уравнениям

$$l'_i = R\left(1 - \sqrt{(2i-1)/2n}\right);$$

$$l''_i = R\left(1 + \sqrt{(2i-1)/2n}\right),$$

где l'_i и l''_i – расстояние от внутренней стенки газопровода соответственно до ближней и дальней точек замера, расположенных в данном кольце, м.

Выполнив замеры и определив скорость в ряде точек исследуемого сечения, рассчитывают сред-

нюю по сечению потока скорость газа $w_{\text{ср}}$.

Объемный расход газа определяется как произведение средней скорости газа на площадь поперечного сечения газопровода: $V = w_{\text{ср}} F$.

Замерив также скорость газа на оси потока w_0 , можно определить коэффициент распределения скоростей по сечению газопровода

$$\alpha_{\text{ср}} = w_{\text{ср}} / w_0 .$$

Однако такой способ определения $w_{\text{ср}}$ допустим лишь в случаях стабильного газового потока, изменение скоростей которого во времени крайне мало. На практике же полученное этим способом соотношение между средней и осевой скоростями может не отражать истинной картины. Это объясняется изменением абсолютной величины скорости газа за время проведения замеров.

В то же время считают, что распределение скоростей по сечению газопровода, т.е. коэффициент $\alpha_{\text{ср}}$, существенно не изменяется с течением времени, несмотря на изменение абсолютной величины скорости газа. Поэтому рекомендуется для определения $\alpha_{\text{ср}}$ одновременно проводить замеры в определенной точке сечения газопровода и на его оси. Определив численно отношение $\alpha = w_i / w_0$ для всех точек замеров, рассчитывают коэффициент распределения скоростей газа по сечению круглого газопровода

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{\alpha_1 + \dots + \alpha_{8n}}{8n} ,$$

где $8n$ – общее число замеров в $4n$ точках при прямом и обратном ходах пневмотрубки вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров. Объемный расход газа проходящего по газопроводу, с учетом коэффициента распределения скоростей по сечению, определяется выражением

$$V = w_0 \alpha_{\text{ср}} F , \text{ м}^3/\text{с} ,$$

где F – площадь сечения газопровода, м^2 ; w_0 – усредненная по времени скорость газа на оси газопровода, $\text{м}/\text{с}$.

Описание экспериментальной установки

При выполнении настоящей работы пользуются пневмометрической трубкой с микроманометром типа ММН. Пневмометрические трубки различных конструкций невелики по диаметрам, поэтому их можно ввести в газопровод через небольшие штуцеры; они не создают добавочного сопротивления потоку и часто из-за сложной конфигурации газопроводов являются единственными приборами для измерения скорости газового потока. При измерении скорости газа пневмометрическими трубками необходимо обеспечивать чистоту отверстий и каналов трубок, даже если конструкция трубки рассчитана на применение для запыленных газов.

Пневмометрическая трубка всегда имеет два канала, один из которых воспринимает полное давление газа, а другой – статическое. При подключении первого канала к штуцеру со знаком плюс, а второго – к штуцеру со знаком минус микроманометр покажет динамическое давление. Оно представляет собой разность между полным давлением потока $P_{\text{пол}}$, действующим в направлении вектора скорости газов, и статическим давлением $P_{\text{ст}}$, замер которого с помощью трубки осуществляется в направлении, перпендикулярном вектору скорости.

В зависимости от конструкции пневмометрической трубки при измерении статического давления имеют место большие или меньшие отклонения от его истинного значения, что в свою очередь сопровождается искажениями в результатах замеров динамического давления. Поэтому в расчетах учитывают поправочный коэффициент пневмотрубки, характеризующий отношение истинного значения динамического давления к замеренному. Для каждой конструкции пневмометрической трубки коэффициент k_1 определяется либо параллельными замерами скорости газового потока данной трубкой и трубкой, коэффициент которой известен, либо на тарировочных стендах в специализированных лабораториях.

Наряду со скоростными трубками Пито-Прандтля, для измерения параметров запыленных газовых потоков больших объемов применяется трубка конструкции НИИОгаза, которая состоит из двух металлических трубок диаметром 6 мм, расположенных параллельно друг другу; конец одной из трубок плавно изогнут под углом 90°. При помощи трубки с загнутым концом замеряется полное, а с помощью прямой трубки – статическое давление газового потока. Конструкция трубки позволяет легко продувать и прочищать ее, что дает возможность многократных измерений без забивания трубки.

Порядок выполнения работы

1 Подготавливают микроанометр, обеспечивая строго горизонтальное положение прибора и установку нулевого уровня этилового спирта в измерительной стеклянной трубке. Для установки прибора в горизонтальное положение служат винтовые ножки и два уровнемера. Нулевое положение рабочей жидкости в измерительной трубке устанавливают при нулевом положении трехходового крана, пользуясь расположенным на крышке резервуара регулятором.

2 Определив число точек замеров по сечению круглого газопровода и просчитав расстояния от внутренней стенки газопровода до каждой точки, размечают пневмометрическую трубку. С этой целью от ее конца, вводимого в газопровод, отмечают длину, равную сумме следующих величин: расстояния от внутренней стенки газопровода до точки замера, толщины стенки газопровода, высоты штуцера и высоты выступающей из штуцера пробки.

3 Скоростную трубку соединяют резиновыми шлангами с микроанометром таким образом, чтобы трубка, воспринимающая полное давление, была присоединена к патрубку со знаком плюс, а трубка, воспринимающая статическое давление, к патрубку со знаком минус.

4 Пневмометрическую трубку после присоединения к микроанометру проверяют на герметичность. Для этого в каналах трубки поочередно создают давление и, плотно закрыв входное отверстие канала исследуемой трубки, контролируют постоянство показаний микроанометра.

5 Скоростную трубку вставляют в штуцер так, чтобы входное отверстие располагалось строго навстречу газовому потоку, и приступают к замерам, перемещая трубку вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров, от ближней стенки газопровода до противоположной и обратно. Носок трубки должен лежать на линии, проходящей через точку замера в исследуемом сечении. В каждой точке замеров записывают показания микроанометра. Кроме того, измеряют температуру газового потока.

Обработка результатов эксперимента

По результатам измерений рассчитывают значения скоростей в точках замеров, среднюю скорость по сечению газопровода и объемный расход газа.

Динамическое давление газа в точках замеров определяют по формуле

$$P_{\text{дин } i} = 9,81mk_1k_2k_3, \text{ Па,}$$

где m – показания по шкале прибора; k_1 – поправочный коэффициент пневмотрубки; k_2 – поправочный коэффициент микроанометра, определяемый как синус угла наклона измерительной трубки прибора; k_3 – поправочный коэффициент, учитывающий соотношение плотностей жидкости, залитой в микроанометр, и чистого спирта ($\rho_{\text{сп}} = 809,5 \text{ кг/м}^3$ при 20 °С).

Скорость газового потока в точках замеров рассчитывают по замеренной величине динамического давления.

Усредненная по сечению круглого газопровода скорость газа определяется выражением

$$w_{\text{ср}} = \frac{1}{8n} \left(\sum_{i=1}^{4n} w_i^+ + \sum_{i=1}^{4n} w_i^- \right), \text{ м/с,}$$

где w_i^+ , w_i^- – значения скоростей газа в точках замеров соответственно при прямом и обратном ходах пневмотрубки вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров, м/с.

Коэффициент распределения скоростей по сечению круглого газопровода рассчитывают согласно выражению

$$\alpha_{\text{cp}} = \frac{1}{8n} \left(\sum_{i=1}^{4n} \alpha_i^+ + \sum_{i=1}^{4n} \alpha_i^- \right),$$

где α_i^+ , α_i^- – значения коэффициентов α_i ($\alpha_i = w_i / w_0$) для точек замеров соответственно при прямом и обратном ходах пневмотрубки вдоль двух взаимно перпендикулярных диаметров.

Объемный расход газа по газопроводу круглого сечения в соответствии со сказанным

$$V = w_0 \alpha_{\text{cp}} F, \text{ м}^3/\text{с},$$

где w_0 – усредненная по времени скорость газа на оси газопровода, м/с.

Найденное значение объемного расхода газа относится к рабочим условиям. При приведении этой величины к нормальным условиям пользуются выражением

$$V_0 = V \frac{273}{273 + t_r} \frac{B \pm p_r}{101361,5}, \text{ м}^3/\text{с},$$

где p_r – давление (разрежение) газа в газопроводе, Па; t_r – температура газа в газопроводе, °С; B – барометрическое давление атмосферного воздуха, Па.

Для построения эпюры в определенном масштабе наносят выбранные точки, проводят вертикали, на которых откладывают полученные в стей. Концы векторов получают профиль скоростей в картинке распределения строить сразу для двух нормали один к другому, например в изометрии (рис. 9).

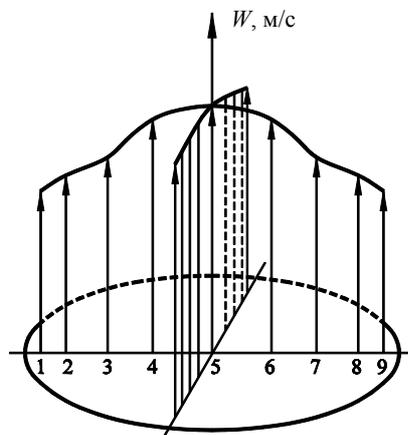


Рис. 9 Эпюра скоростей газового потока по сечению круглого газопровода

скоростей по горизонтали в откладывают диаметр газопровода и измерений. Затем в этих точках также в определенном масштабе результате расчетов значения скоростей соединяют плавной кривой и сечения газопровода. Более наглядная скоростей получится, если эпюру диаметров сечения, расположенных по изобразив ее в какой-нибудь проекции,

Контрольные вопросы

- 1 Устройство и принцип
- 2 Устройство и работа
- 3 Как снимают поле (прямоугольного) газопровода?
- 4 Порядок проведения эксперимента.
- 5 Как рассчитывают коэффициент усреднения скоростей и объемный расход газа по сечению газопровода?
- 6 Графическое представление результатов эксперимента.

действия пневмотрубок. микроманометра типа ММН. скоростей по сечению круглого

Лабораторная работа 4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА С ВЗВЕШЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ПРИ ИНЕРЦИОННОМ РАЗДЕЛЕНИИ НА ПЛАСТИНЕ

Цель работы: ознакомиться с принципами работы инерционных сепараторов газового потока и взвешенных частиц, изучить законы движения и сепарации твердых частиц при обтекании препятствий, рассчитать поле скоростей газового потока в аппарате с вертикальной перегородкой, определить компоненты скорости и результирующую скорость среды в ряде точек.

Оборудование и технические средства: персональный компьютер, математический пакет Waterloo Maple.

Теоретические положения

В каналах многих технологических аппаратов движется двухфазный поток, содержащий газ и взвешенные полидисперсные частицы. Так как объемная концентрация частиц в потоке обычно невелика, можно рассматривать движение невзаимодействующих твердых частиц различных размеров в отдельности, как в монодисперсном потоке. Для определения возможностей сепарации твердых частиц данного размера от газа нужно рассчитать траектории их движения в канале аппарата.

Инерционное разделение наиболее часто применяется для предварительной очистки газа с целью снижения запыленности, а также для защиты от абразивного износа. Скорость газа на входе в аппараты инерционного улавливания относительно высокая – от 15 м/с и выше, поэтому они имеют небольшие габариты и металлоемкость. Эти аппараты имеют малое гидравлическое сопротивление и могут встраиваться непосредственно в газоходы. Схемы простейшего инерционного сепаратора представлена на рис. 10.

Улавливание твердых частиц в инерционных сепараторах газового потока осуществляется за счет резкого изменения направления движения газового потока. В результате твердые частицы, двигаясь по инерции, сепарируются из потока на стенки аппарата, а затем отводятся в бункер.

Для описания движения твердой частицы основным является дифференциальное уравнение движения ее центра массы

$$m \frac{dv}{dt} = \sum \mathbf{P},$$

где m – массы твердой частицы; \mathbf{v} – вектор абсолютной скорости части-

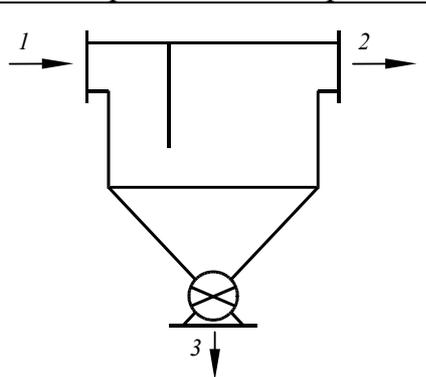


Рис. 10 Схема инерционного сепаратора с вертикальной перегородкой:

1 – вход газа с взвешенными твердыми частицами; 2 – выход очищенного газа; 3 – выход твердой фазы

цы, $\sum \mathbf{P}$ – векторная сумма, действующих на частицу сил.

В общем случае сумма сил, действующих на частицу,

$$\sum \mathbf{P} = \mathbf{P}_a + (\mathbf{P}_G + \mathbf{P}_A) + \mathbf{P}_p + \mathbf{P}_{пр},$$

где \mathbf{P}_a – сила аэродинамического сопротивления движению частицы в газовом потоке; $\mathbf{P}_G + \mathbf{P}_A$ – равнодействующая силы тяжести и архимедовой силы; \mathbf{P}_p – сила, действующая на частицу при нахождении ее в неравномерном поле давлений; $\mathbf{P}_{пр}$ – равнодействующая прочих сил.

Сила аэродинамического сопротивления для сферической частицы считается направленной против скорости \mathbf{w} ее движения относительно газа:

$$\mathbf{P}_a = -C 0,25 \pi d^2 \cdot 0,5 \rho_r w^2 \frac{\mathbf{w}}{w},$$

где C – коэффициент сопротивления.

Если \mathbf{v} и \mathbf{u} – абсолютные скорости частицы и газа, то при обтекании частицы $\mathbf{w} = \mathbf{v} - \mathbf{u}$. При реальных относительных скоростях движения частиц, коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса

$$C = A \operatorname{Re}^{-n},$$

где A и n – постоянные, зависящие от режима движения:

Диапазон чисел Рейнольдса	$\operatorname{Re} \leq 0,6$	$0,6 < \operatorname{Re} \leq 17$	$17 < \operatorname{Re} \leq 700$	$700 < \operatorname{Re} < 10^5$
A	24,0	26,5	11,5	0,44
n	1,0	0,8	0,5	0

По сравнению с силой аэродинамического сопротивления все другие силы, действующие на пылевую частицу в канале инерционного пылеуловителя, малы, что можно показать оценочными расчетами. В реальных условиях архимедова сила приводит к незначительному уменьшению равнодействующей $\mathbf{P}_G + \mathbf{P}_A$ вследствие малости отношения плотностей газа и материала пылевой частицы. Сила тяжести (в рассматриваемых условиях движения мелких твердых частиц) на несколько порядков меньше силы аэродинамического сопротивления. Если, например, плотность твердых частиц $\rho = 2000 \text{ кг/м}^3$, $d = 10 \text{ мкм}$, скорость перемещения частиц относительно газа $w = 1 \text{ м/с}$, плотность воздуха $\rho_r = 1,2 \text{ кг/м}^3$ и его кинематическая вязкость при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\nu = 15,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, то с учетом ранее приведенных соотношений $P_G / P_A = 0,7 \cdot 10^{-2}$.

Сила, действующая на частицу при ее движении в неравномерном поле давлений, также невелика. В условиях предыдущего примера при градиенте давления 50 Па/мм имеет место отношение $P_p / P_a \approx 1,5 \cdot 10^{-2}$.

К прочим силам могут быть отнесены силы аэродинамического взаимодействия между твердыми частицами, их взаимодействия при столкновениях и электростатические силы, которыми при небольшой концентрации пыли в двухфазном потоке можно пренебречь.

Исходя из приведенных сравнительных оценок, ввиду малости всех рассмотренных сил по сравнению с силой аэродинамического сопротивления, дифференциальное уравнение движения пылевой частицы можно записать

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{P}_a.$$

Предполагая, что движение в инерционном сепараторе является плоским, т.е. картина течения одинакова во всех плоскостях по ширине аппарата, можно спроецировать векторы обеих частей дифференциального уравнения на неподвижные (инерциальные) прямоугольные оси координат и получить систему уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = P_{ax}; \\ m \frac{dv_y}{dt} = P_{ay}. \end{cases}$$

Проекция силы

$$P_{ax} = -P_a \frac{w_x}{w}; \quad P_{ay} = -P_a \frac{w_y}{w}.$$

Скорость перемещения твердой частицы относительно газа и проекции этой скорости

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2}; \quad w_x = v_x - u_x; \quad w_y = v_y - u_y.$$

Представленная система дифференциальных уравнений с учетом начальных условий положения

частицы и ее скорости, которую можно на удалении от перегородки принять равной скорости газового потока, аналитического решения не имеет. Однако эта задача может быть решена численными методами, например, Эйлера или Рунге-Кутты.

Основная проблема при моделировании параметров пылегазового потока в инерционных пылеуловителях заключается в определении силы аэродинамического сопротивления, поскольку необходимо располагать распределением скоростей газа u в аппарате. Поэтому весьма важным является расчет скоростей движения газа.

Считая поток газа несжимаемым (это допущение вполне оправдано при скорости движения газа менее 100 м/с) и движущимся стационарно, можно для определения поля скоростей применить характеристическую функцию плоского потока и метод конформного преобразования. Плоский потенциальный поток в условиях установившегося движения однозначно характеризуется двумя функциями, зависящими только от координат x, y : потенциалом скоростей $\varphi(x, y)$ и функцией тока $\psi(x, y)$. Геометрически каждая из этих функций может быть семейством линий: функция φ – семейством линий $\varphi(x, y) = \text{const}$, функция ψ – (рис. 11).

В случае установившегося движения линии равного потенциала в этом случае являются линиями, вдоль которых происходит.

Зависимость между потенциалом скоростей и функцией тока плоского потока может быть выражена с помощью соответствующих

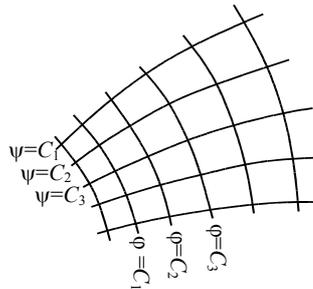


Рис. 11 Линии тока и линии равного потенциала

движения поток течет по линиям тока; в этом случае являются линиями, вдоль которых происходит.

Зависимость между потенциалом скоростей и функцией тока плоского потока может быть выражена с помощью соответствующих

$$u_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad u_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y};$$

$$u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Сопоставляя здесь равенства для одноименных составляющих скорости можно получить

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Данные уравнения представляют собой дифференциальные уравнения Коши-Римана, которым удовлетворяют вещественная и мнимая части всякой регулярной функции комплексного переменного $f(z)$ (где $z = x + iy$), и наоборот, если какие-либо функции $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, y)$ удовлетворяют этим уравнениям, то их можно рассматривать как вещественную и мнимую части функции комплексного переменного. На этом основано применение комплексной переменной к теории плоского потенциального потока сплошной среды.

Функция $\chi = \varphi + i\psi = f(z)$ называется характеристической функцией плоского потока или комплексным потенциалом. Все кинетические элементы движения могут быть выражены непосредственно через характеристическую функцию. Например, взяв производную от комплексного потенциала, находим:

$$\frac{d\chi}{dz} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} + i \frac{\partial \psi}{\partial x} = u_x - iu_y.$$

Модуль этой производной дает абсолютное значение вектора скорости в данной точке

$$\left| \frac{d\chi}{dz} \right| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = u.$$

Введение комплексного потенциала значительно упрощает исследование плоского потока среды, поскольку вместо двух функций φ и ψ , зависящих от двух переменных x и y , имеем одну функцию χ , зависящую от одного независимого комплексного переменного z . Кроме этого, с помощью функций комплексного переменного можно получать характеристики различных плоских потоков, обтекающих

заданное тело. Если известна характеристическая функция плоского потока $\chi = f(z)$ и взята какая-либо аналитическая функция $F(\zeta)$ комплексного переменного $\zeta = \xi + i\eta$, то, приняв эту функцию за независимое переменное $z = F(\zeta)$, получим характеристическую функцию некоторого плоского потока, параллельного плоскости ζ . Преобразование плоскости z в плоскость ζ с помощью функции $z = F(\zeta)$ (или, вернее, с помощью обратной функции $\zeta = F_1(z)$) называется конформным преобразованием, т.е. преобразованием при котором сохраняется подобие бесконечно малых элементов. Н.Е. Жуковским были впервые указаны преобразующие функции, с помощью которых можно определить поле скоростей при обтекании профилей различных крыльев.

Практически всякую характеристическую функцию $\chi = f(\zeta)$ можно рассматривать как полученную путем конформного преобразования $z = f(\zeta)$ из функции $\chi = z$, которая представляет собой характеристическую функцию поступательного потока, текущего вдоль оси x скоростью равной единице. Поступательный поток $\chi = z$ дает обтекание плоской, бесконечно тонкой пластинки, поставленной параллельно вектору скорости.

Поступательный поток, текущий вдоль оси x со скоростью U и обтекающий тонкую горизонтальную пластинку, описывается характеристической функцией $\chi = Uz = U(x + iy)$. Если применить к этой характеристической функции конформное преобразование $z = \zeta + \frac{r_0^2}{\zeta}$, то комплексный потенциал

$\chi = U \left(\zeta + \frac{r_0^2}{\zeta} \right)$ будет описывать обтекание кругового цилиндра радиусом r_0 на плоскости ζ (рис. 12).

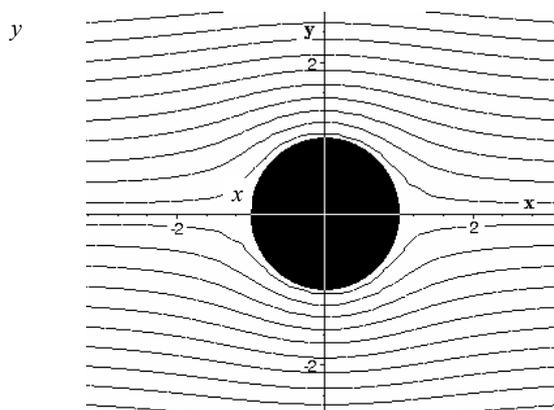


Рис. 12 Линии тока при обтекании кругового цилиндра

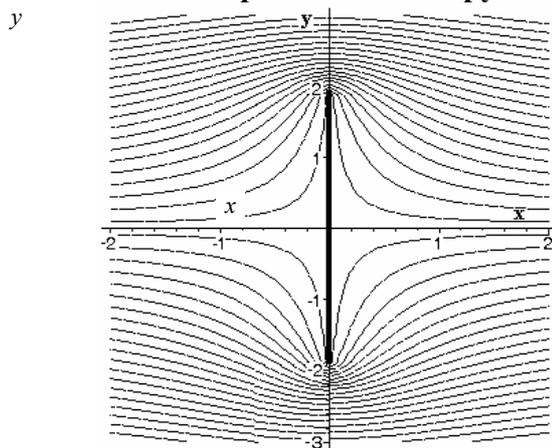


Рис. 13 Линии тока при обтекании пластины поставленной перпендикулярно потоку

Если к потоку с характеристической функцией $\chi = U \left(z + \frac{r_0^2}{z} \right)$, обтекающему круговой цилиндр с ра-

диусом r_0 применить конформное преобразование $\zeta = z - \frac{r_0^2}{z}$ (или $z = \frac{\zeta}{2} \pm \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4r_0^2}}{2}$), то можно получить

обтекание плоской пластинки, перпендикулярной к потоку с длиной $4r_0$ (рис. 13).

Таким образом, последнее преобразование позволяет смоделировать обтекание плоской пластинки пылегазовым потоком и определить поле скоростей, необходимое для расчета скоростей и траекторий частиц в инерционном пылеуловителе.

Порядок выполнения работы

1 Осуществить загрузку персонального компьютера.

2 Запустить математический пакет Maple.

3 Используя представленный ниже синтаксис и функции Maple получить картину и параметры обтекания пластины инерционного пылеуловителя. Скорость несущего потока на входе в пылеуловитель и геометрические размеры пластины выбираются по индивидуальным заданиям в соответствии с вариантом.

1) Сбросить все параметры, используя команду restart:

> **restart;**

2) Задать комплексный потенциал обтекания кругового цилиндра:

> **chi := U*(z + r^2/z);**

$$\chi := U \left(z + \frac{r^2}{z} \right)$$

3) Разрешить выражение для конформного преобразования $\zeta = z - \frac{r_0^2}{z}$ относительно z :

> **sz := solve(zeta = z-r^2/z,z);**

$$sz := \frac{\zeta}{2} + \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4r^2}}{2}, \frac{\zeta}{2} - \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4r^2}}{2}$$

4) Подставить второе решение (описывает обтекание слева на право) в выражение для комплексного потенциала:

> **chi := subs(z = sz[2],chi);**

$$\chi := U \left(\frac{\zeta}{2} - \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4r^2}}{2} + \frac{r^2}{\frac{\zeta}{2} - \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4r^2}}{2}} \right)$$

5) Задать скорость потока на входе в пылеуловитель и параметры пластины, учитывая, что параметр r равен половине длины пластины инерционного пылеуловителя:

> **U := 1; r := 1;**

$$U := 1$$

$$r := 1$$

6) Подключить графические пакеты Maple:

> **with(plots): with(plottools):**

7) Построить пластину:

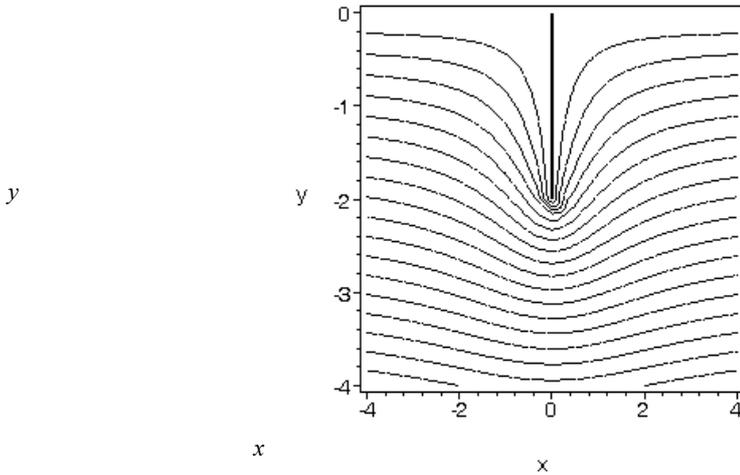
```
> g1 := line([0,0,0], [0,-2*r,0],
color = red, thickness = 2);
```

8) Получить картину обтекания:

```
> g2 := complexplot3d(Im(chi), zeta = -4-4*I..4 + 0*I,
style = contour, orientation = [-90,0],
axes = boxed,color = blue);
```

9) Отобразить совмещенные графические данные:

```
> display(g1,g2);
```



10) Выделить компоненту скорости вдоль оси x:

```
> ux := Re(diff(chi,zeta));
```

$$u_x := \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \Re \left(-\frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 + 4}} - \frac{2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\zeta^2 + 4}} \right)}{\left(\frac{\zeta}{2} - \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4}}{2} \right)^2} \right)$$

10) Выделить компоненту скорости вдоль оси y:

```
> uy := -Im(diff(chi,zeta));
```

$$u_y := \frac{1}{2} \Im \left(-\frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 + 4}} - \frac{2 \left(\frac{1}{2} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\zeta^2 + 4}} \right)}{\left(\frac{\zeta}{2} - \frac{\sqrt{\zeta^2 + 4}}{2} \right)^2} \right)$$

11) Оформить выражение для расчета компонент скорости потока в точках с координатами (x, y) в виде функций.

```
> uxf := (x,y)->subs(zeta = x + I*y,ux);
```

$uxf := (x, y) \rightarrow \text{subs}(\zeta = x + y I, u_x)$

```
> uyf := (x,y)->subs(zeta = x + I*y,uy);
```

$uyf := (x, y) \rightarrow \text{subs}(\zeta = x + y I, u_y)$

12) Рассчитать значения проекций скорости на координатные оси в конкретной точке.

```
> evalf(uxf(-r,-r));
```

0.5688644811

```
> evalf(uyf(-r,-r));
```

Контрольные вопросы

- 1 Принцип работы инерционных сепараторов для разделения газа и взвешенных частиц.
- 2 Дифференциальное уравнение движения твердой частицы в инерционном аппарате с плоской пластиной, силы действующие на частицу.
- 3 Методика определения поля скоростей стационарного потока с помощью комплексного потенциала.
- 4 Суть конформных преобразований при получении картины обтекания различных профилей.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Коузов П.А., Мальгин А.Д. Очистка от пылей газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982.
- 2 Лабораторный практикум по улавливанию и утилизации пылей и газов / Ю.П. Павленко, В.М. Билюшов, В.Д. Овсяник и др. М.: Metallurgy, 1996.
- 3 Петунин А.Н. Методы и техника измерений параметров газового потока. М.: Машиностроение, 1972.
- 4 Степанов Г.Ю., Зицер И.М. Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986.
- 5 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: 7-е изд. испр. М.: Дрофа, 2003.