

Лабораторная работа № 6

Исследование работы электрофильтра

1. Цель работы

Изучение принципа работы электрофильтра. Экспериментальное определение степени очистки воздуха от частиц аэрозоля. Ознакомление с конструкцией малогабаритного электрофильтра.

2. Предварительные сведения

Одним из наиболее совершенных способов очистки промышленных газов от твердых и жидких частиц является очистка в электрофильтрах.

Принцип действия электрофильтра основан на направленном движении заряженных частиц под действием электрического поля. В электрофильтре частицам сообщается избыточный заряд, и в пространстве между электродами, создающими электрическое поле, эти частицы движутся по направлению к электроду, имеющему полярность, противоположную полярности зарядов частиц, осаждаясь на этом электроде.

Электрофильтры, оказывая малое гидравлическое сопротивление потоку газа, обеспечивают высокую степень очистки, пригодны для использования в самых различных условиях, в том числе при высокой температуре и для химически активных газов. Они применяются в цементной, химической, металлургической промышленности, на тепловых электростанциях.

В настоящее время широко используются трубчатые и пластинчатые электрофильтры. Трубчатые электрофильтры (рис. 6.1, а) представляют собой аппараты с вертикальным потоком газа. Подлежащие очистке газы проходят внутри трубчатых осадительных электродов, по оси которых располагаются коронирующие провода.

Пластинчатые электрофильтры (рис. 6.1, б) - аппараты с осадительными электродами в виде пластин, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, с размещенными между пластинами коронирующими электродами. Поток очищаемого газа проходит между пластинами. В одном корпусе электрофильтра может быть расположено несколько независимых последовательно расположенных систем электродов.

В электрофильтре с резко неоднородным электрическим полем между электродами образуется коронный разряд с ионизацией газа вблизи электрода с малым радиусом кривизны. В остальной, большей части межэлектродного промежутка имеются ионы только

одного знака, которые движутся в направлении к противоположному осадительному электроду. В поле коронного разряда ионы, сталкиваясь с частицами, осаждаются на них, сообщая частицам заряд. Зарядившись, частицы под действием электрического поля движутся к осадительным электродам и осаждаются на них. Слой осажденных частиц удаляется периодическим встряхиванием осадительных электродов.

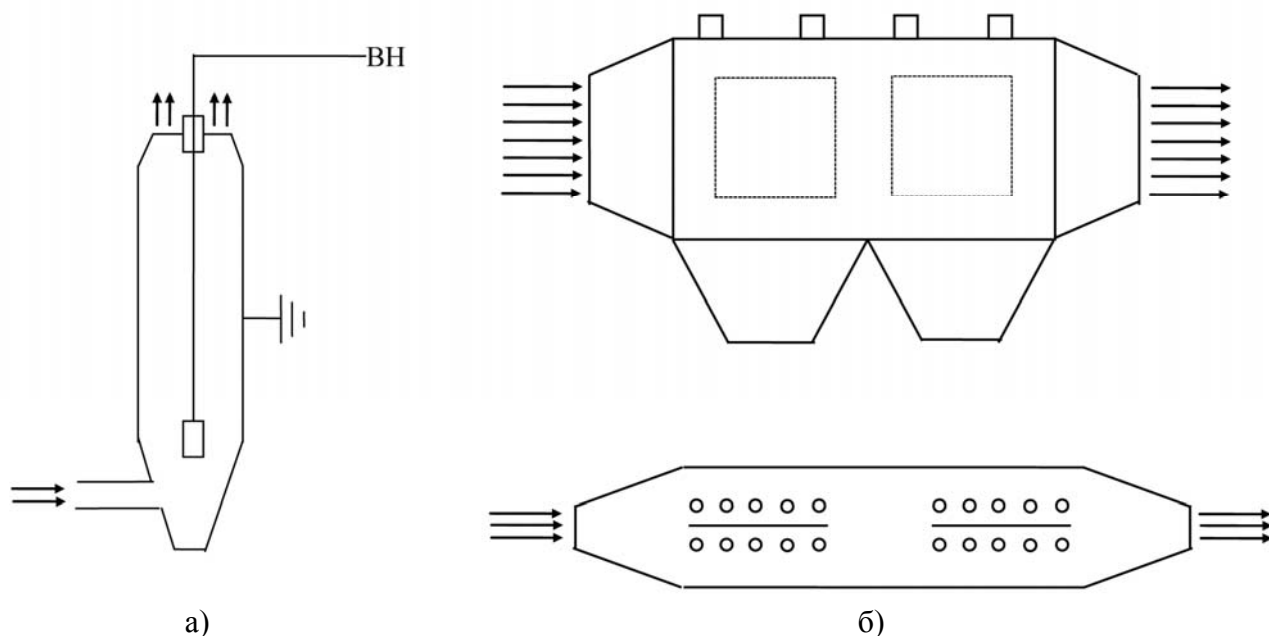


Рис. 6.1. Виды электрофильтров:

а – трубчатый; б – пластинчатый

В пластинчатых электрофильтрах электрическое поле несколько слабее, чем в трубчатых, но пластинчатые электрофильтры проще изготавливать, и в них легче обеспечить встряхивание электродов.

По объему очищаемого газа электрофильтры подразделяются на фильтры высокой производительности – более 10 тыс. м³ очищаемого газа в час и малогабаритные фильтры – 1-2 тыс. м³.

По расположению электродов электрофильтры подразделяются на двухзонные (рис. 6.2) (где зоны зарядки и осаждения частиц конструктивно выполнены в виде отдельных частей) и однозонные (где указанные зоны конструктивно совмещены).

В настоящей работе изучается процесс осаждения в пластинчатом электрофильтре на примере макета однозонного электрофильтра и реальной промышленной конструкции двухзонного малогабаритного электрофильтра.

Основной характеристикой электрофильтра является степень очистки газов или эффективность. Она определяется массой частиц в газе до поступления в электрофильтр и после выхода из него:

$$\eta = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100, \% \quad (6.1)$$

где m_1 – удельное содержание частиц в газе, поступающем в электрофильтр, кг/м³; m_2 – удельное содержание частиц в газе, выходящем из электрофильтра, кг/м³.

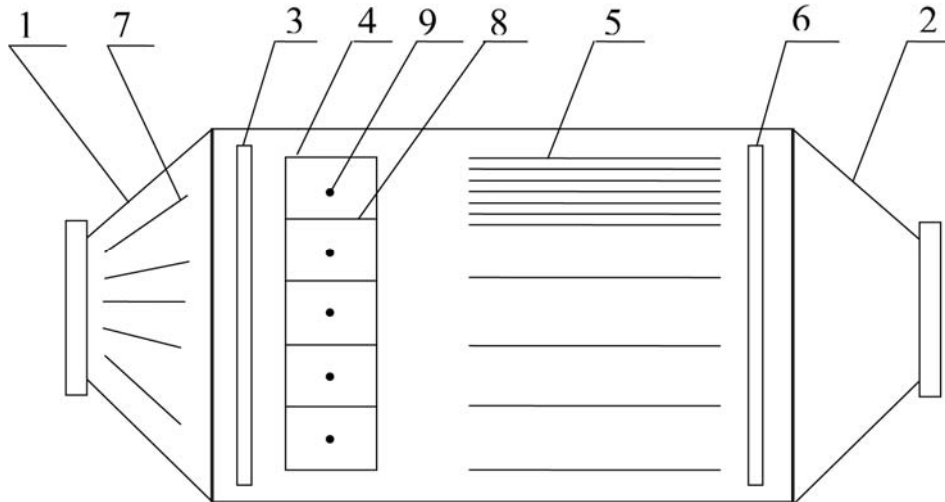


Рис. 6.2. Схема основных элементов малогабаритного двухзонного электрофильтра

1 – диффузор; 2 – конфузор; 3 – предфильтр; 4 – зарядное коронирующее устройство; 5 – электростатическое осадительное устройство; 6 – механический фильтр; 7 – газораспределительное приспособление; 8 – заземленные пластины; 9 – провода

В рассматриваемой конструкции электрофильтра характер распределения концентрации частиц для каждого поперечного сечения одинаков, что связано с определяющим влиянием турбулентного перемешивания, и не зависит от расстояния от входа в электрофильтр. По мере удаления от входа абсолютные значения концентрации частиц вдоль электрофильтра уменьшаются. Степень очистки газов определяется средним по сечению содержанием пыли $m_{\text{ср}}$. На расстоянии x от входа в электрофильтр удельное содержание частиц вблизи осадительного электрода $m_{\text{ос}}$ связана со средним удельным содержанием $m_{\text{хср}}$ следующим образом:

$$m_{\text{ос}} = m_{\text{хср}} \chi, \quad (6.2)$$

где χ – коэффициент неоднородности, постоянная величина при неизменном характере распределения частиц для любого сечения.

Уменьшение массы пыли dm_x в сечении электрофильтра на расстоянии x от входа за счет осаждения на поверхность электродов $2b \cdot dt$ за время dt равно:

$$dm_x = m_{\text{хос}} \cdot 2b \cdot dx \cdot v_{\text{ос}} \cdot dt, \quad (6.3)$$

где $v_{\text{ос}}$ – скорость дрейфа под действием поля у осадительного электрода; b – ширина осадительного электрода.

За счет осаждения частиц происходит изменение среднего содержания частиц. Это изменение содержания связано с изменением массы, то есть:

$$dm_x = m_{\text{хсп}} \cdot 2b \cdot h \cdot dx, \quad (6.4)$$

где h – расстояние между коронирующими и осадительными электродами.

Приравнивая правые части (6.3) и (6.4) с учетом (6.2) $m_{\text{хос}} = m_{\text{хсп}} \chi$ можно записать:

$$\frac{dm_{\text{хсп}}}{m_{\text{хсп}}} = -\frac{v_{\text{ос}} dt \chi}{h}, \quad (6.5)$$

И после интегрирования соотношение между средним содержанием пыли на выходе и входе электрофильтра имеет вид:

$$m_2 = m_1 e^{-\frac{v_{\text{ос}} \chi t}{h}}, \quad (6.6)$$

где t – время пребывания газа в электрофильтре, $t = l/w$ (l – длина электрофильтра, w – скорость газа).

Таким образом,
$$m_2 = m_1 e^{-\frac{v_{\text{ос}} \chi l}{hw}}, \quad (6.7)$$

или на основании определения степени очистки газа в электрофильтре:

$$\eta = 1 - e^{-\frac{v_{\text{ос}} \chi l}{hw}}. \quad (6.8)$$

Скорость дрейфа частиц $v_{\text{ос}}$ в электрическом поле с напряженностью $E_{\text{ос}}$ рассчитывается из баланса сил, а именно, равенства электрической силы $F_{\text{эл}}$, действующей на частицу линейного размера a с зарядом $q_{\text{ср}}$ в направлении к электроду, и силы $F_{\text{сопр}}$ сопротивления среды с коэффициентом динамической вязкости μ .

$$F_{\text{эл}} = q_{\text{ср}} E_{\text{ос}}; \quad F_c = 6\pi\mu a v_{\text{ос}}; \quad q_{\text{ср}} E_{\text{ос}} = 6\pi\mu a v_{\text{ос}}.$$

Отсюда следует, что:

$$v_{\text{ос}} = B q_{\text{ср}} E_{\text{ос}},$$

где $B = 1/6\pi\mu a$ – подвижность частиц; $q_{\text{ср}} = 4\pi\epsilon_0 k_\epsilon E_{\text{ср}} a^2$ – средний заряд частиц в межэлектродном промежутке; $E_{\text{ос}}$ – напряженность электрического поля у осадительного электрода; $E_{\text{ср}} = U/h$ – средняя напряженность в межэлектродном промежутке, В/м, при напряжении между электродами U , В; μ – вязкость воздуха, при нормальных атмосферных условиях $\mu = 1,83 \cdot 10^{-5}$ Нс/м²; a – радиус частицы; коэффициент $k_\epsilon = 3\epsilon/(\epsilon + 2)$.

Скорость газов в каналах электрофильтра рассчитывается как:

$$w = \frac{Q}{2h \cdot b \cdot h \cdot 3600},$$

где Q – объем очищаемого газа, м³/час; $2h$ – ширина канала электрофильтра, м; b – высота канала, м; n – число каналов; w – в м/с.

Из формулы (6.8) следует, что степень очистки газов растет с увеличением скорости осаждения частиц и длины электрофильтра, но уменьшается с ростом межэлектродного расстояния и скорости газа. Современные электрофильтры обеспечивают степень очистки газов, равную 98–99 %.

Скорость движения частиц к осадительному электроду пропорциональна размеру частиц и квадрату напряженности электрического поля. Следовательно, в первую очередь в электрофильтре осаждаются крупные частицы. Квадратичный характер зависимости скорости осаждения от напряженности свидетельствует о целесообразности работы при максимально возможном напряжении.

Осаждение частиц на электроды из области газа, непосредственно примыкающей к электродам, происходит под действием сил электрического поля. Убыль частиц из этой области восполняется в результате перемещения частиц из остального межэлектродного пространства под действием поля и в основном за счет увеличения частиц турбулентными пульсациями газа. Благодаря сравнительно большой скорости газа в электрофильтре (1.0–1.5 м/с) и значительным размерам каналов ($2h > 250$ мм), течение газа всегда имеет турбулентный характер (число Рейнольдса $Re > 2000$). Коэффициент неоднородности распределения концентраций χ для наиболее мелкой фракции частиц составляет 1,1–1,3. В электрофильтрах турбулентная диффузия, помимо выравнивания концентрации частиц, приводит к возрастанию среднего заряда частиц за счет попадания определенной доли частиц в область с повышенным значением напряженности поля у коронирующих электродов.

Существенное влияние на работу электрофильтров оказывает унос осажденной пыли с электродов. Возвращение в поток даже малой части осажденной пыли может привести к заметному ухудшению очистки газов и несоответствию расчетам по теоретической формуле.

Повторный унос частиц с электродов определяется следующими процессами: 1) перезарядкой и отталкиванием от осадительного электрода частиц с малым удельным сопротивлением; 2) выбивание частиц из слоя при осаждении новых частиц; 3) непосредственным отрывом частиц от слоя под действием потока газа; 4) уносом пыли при встряхивании электродов. Для уменьшения повторного уноса необходимы, по возможности, небольшая скорость газа с равномерным распределением скорости по сечению электрофильтра, рациональные частота встряхивания и ускорение при встряхивании электродов, обеспечивающие сбрасывание пыли крупными агрегатами, специальная конструкция как коронирующего, так и осадительных электродов.

Коронирующие электроды можно разделить на две группы (рис. 6.3). К первой группе относятся электроды, которые не имеют фиксированных коронирующих точек. При отрицательной короне – отрицательной полярности коронирующих электродов – светящиеся

точки располагаются вдоль электрода на разных расстояниях друг от друга в зависимости от состояния поверхности электрода. Типичные виды электродов этой группы: круглый диаметром 2–4 мм, квадратный со стороной 3–4 мм и штыкового сечения, вписывающийся в квадрат со стороной 4–5 мм (рис. 6.3, а). Ко второй группе относятся электроды с фиксированными точками разряда по их длине. Типичными видами этих электродов являются колючая проволока, пилообразные и игольчатые электроды (рис. 6.3, б). Электроды второй группы при равном напряжении и равном межэлектродном расстоянии обеспечивают значительно больший ток короны, чем электроды первой группы. Легче обеспечивается необходимая механическая прочность.

Осадительные электроды электрофильтров также имеют разнообразную форму: они имеют гладкую поверхность без острых углов, необходимую для обеспечения высокой напряженности электрического поля, и полости, позволяющие стряхивать пыль с минимальным вторичным уносом (рис. 6.3, в).

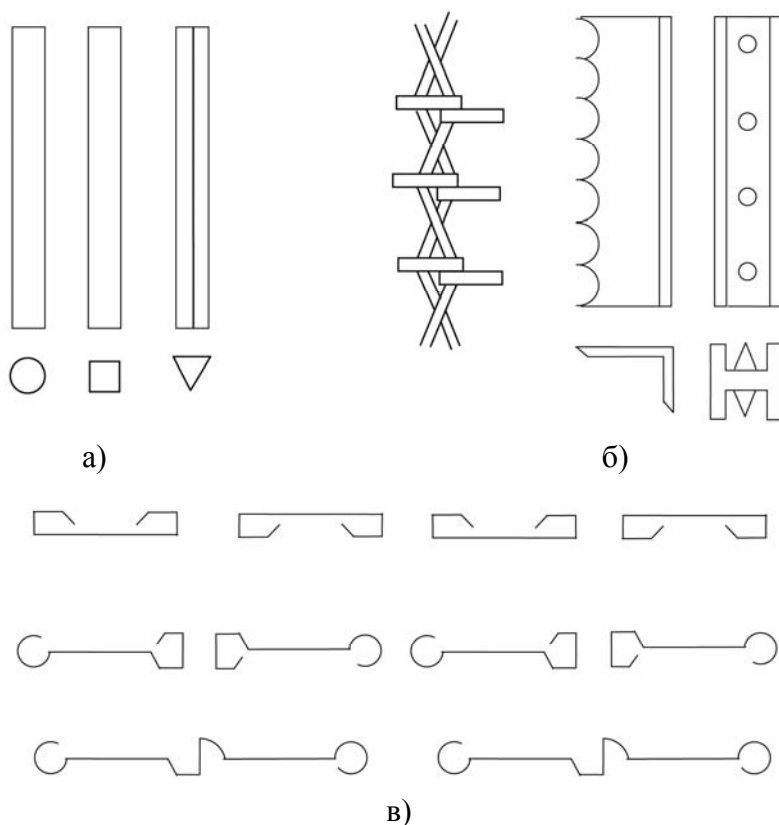


Рис. 6.3. Электроды электрофильтров

а – гладкие коронирующие электроды; б – коронирующие электроды с фиксированными точками разряда; в – осадительные электроды

Для успешной работы электрофильтров имеет важное значение установка коронирующих проводов точно по оси между осадительными пластинами. До настоящего времени применялись аппараты с расстоянием между осадительными электродами 275 мм. Шаг между коронирующими проводами составляет 100–200 мм. Имеется тенденция к

увеличению расстояния между осадительными электродами до 450 мм и даже до 600 мм. Опытные-промышленные испытания таких электрофильтров показали, что, несмотря на предсказания теории, снижение степени очистки не происходит, так как существенно возрастает пробивное напряжение промежутков.

Так эффективность работы электрофильтров существенно зависит от удельной электрической проводимости пыли. Пыли с удельной проводимостью γ выше 10^{-2} (Ом м)⁻¹ улавливаются плохо, так как при осаждении частицы быстро перезаряжаются и отталкиваются от электрода. Пыли с $\gamma = 10^{-2} - 10^{-8}$ (Ом м)⁻¹, которых большинство, хорошо улавливаются в электрофильтрах. Заряды частиц пыли равномерно стекают на осадительный электрод по мере подхода новых частиц из газового промежутка.

Частицы с удельной проводимостью менее 10^{-8} (Ом·м)⁻¹ наиболее трудно улавливаются в электрофильтрах из-за возникновения обратной короны. Поскольку осевшие на электрод частицы не разряжаются из-за своей проводимости, то в осажденном слое происходит накопление зарядов. При этом в слое растет напряженность электрического поля. При достижении определенного значения напряженности поля в слое пыли происходит пробой. В промежуток впрыскиваются ионы, противоположные по знаку полярности коронирующего электрода. Это приводит к образованию биполярной короны. Заряд частиц уменьшается. В результате обратная корона резко уменьшает интенсивность осаждения частиц. Меры борьбы с обратной короной следующие:

1) Кондиционирование газов. В очищаемый газ вводятся в виде мелких капель вода, аммиак или другие реагенты, которые, осаждаясь на поверхности частиц, увеличивают поверхностную электрическую проводимость частиц.

2) Снижение плотности тока основного коронного разряда. Уменьшение плотности тока приводит к замедлению нарастания напряжения на слое и, следовательно, к уменьшению вероятности возникновения обратной короны. Снижение плотности тока возможно за счет выбора рациональных параметров коронирующих электродов и применения импульсного питания электрофильтров.

3) Применение системы питания электрофильтров напряжением переменной полярности. Этот способ питания сводится к изменению полярности постоянного напряжения на электрофильтре на противоположную в момент, когда напряжение на слое приблизится к напряжению возникновения обратной короны. Обычно электрофильтры работают при отрицательной полярности постоянного напряжения, так как в этом случае пробивное напряжение больше.

Изменение полярности приводит к разрядке слоя и накоплению заряда противоположного знака. Затем напряжение снова переключается и т. д.

3. Описание установки

Экспериментальная установка для исследования работы электрофильтра состоит из следующих элементов (рис. 6.4):

- экспериментальный электрофильтр;
- источник высокого напряжения (ИВН);
- генератор аэрозоля (частиц, вибр.);
- вентилятор;
- контрольно-измерительные приборы.

Основным элементом лабораторного стенда является двухзонный малогабаритный электрофильтр.

Экспериментальный электрофильтр (см. рис. 6.4) состоит из корпуса 1 с входным 2 и выходным 3 патрубками. В корпусе установлены последовательно друг за другом газораспределительная решетка 4, сетка 5, зарядная камера 6, осадительная камера 7 и всасывающий вентилятор 8. Зарядная камера выполнена в виде заземленных параллельных друг другу пластин 9, образующих между собой каналы для очищаемого газа. Всего каналов – в разных вариантах шесть и восемь. Между пластинами натянуты цилиндрические и игольчатые провода 10. На провод подается напряжение U , при этом в межэлектродном промежутке возникает коронный разряд.

Осадительная камера выполнена в виде параллельных плоских электродов 11, на которые подается напряжение.

Зарядная камера двухзонного электрофильтра моделирует один модуль пластинчатого электрофильтра.

В работе используются два канала зарядного устройства. В одном канале установлен цилиндрический провод диаметром $250 \cdot 10^{-6}$ м. В другом канале установлен провод с игольчатыми электродами.

Вместе с осадительной камерой двухзонный электрофильтр является самостоятельным газоочистным аппаратом, который широко применяется для очистки воздуха на рабочих местах, например, при электросварке, шлифовании, пересыпке пылящих продуктов и т. п.

Высоковольтный блок питания (источник высокого напряжения – ИВН) включает в себя узел управления (расположен на торцевой части корпуса) и высоковольтного узла – трансформатора и умножителя напряжения (расположен на задней стенке корпуса). Напряжение на зарядном устройстве электрофильтра регулируется ступенчато: $U = 8, 10$ и 12 кВ. Напряжение на осадительной камере $U_k = 0,5U_{ст}$.

Для измерения напряжения используется микроамперметр “мкА” с добавочным сопротивлением “ R_d ”.

На выходном патрубке установлен матерчатый фильтр (3) для улавливания частиц после электрофильтра.

В экспериментальном стенде используется вентилятор (8) ВВД. Двигатель вентилятора питается трехфазным напряжением 380 В. Кнопки включения и отключения расположены на торцевой части корпуса вентилятора. Одновременно с включением двигателя вентилятора подается трехфазное напряжение 220 В на блок управления высоковольтного источника. При этом на пульте источника загорается зеленая лампа. С помощью системы управления на выходе источника высокого напряжения устанавливается напряжение от 8 до 12 кВ.

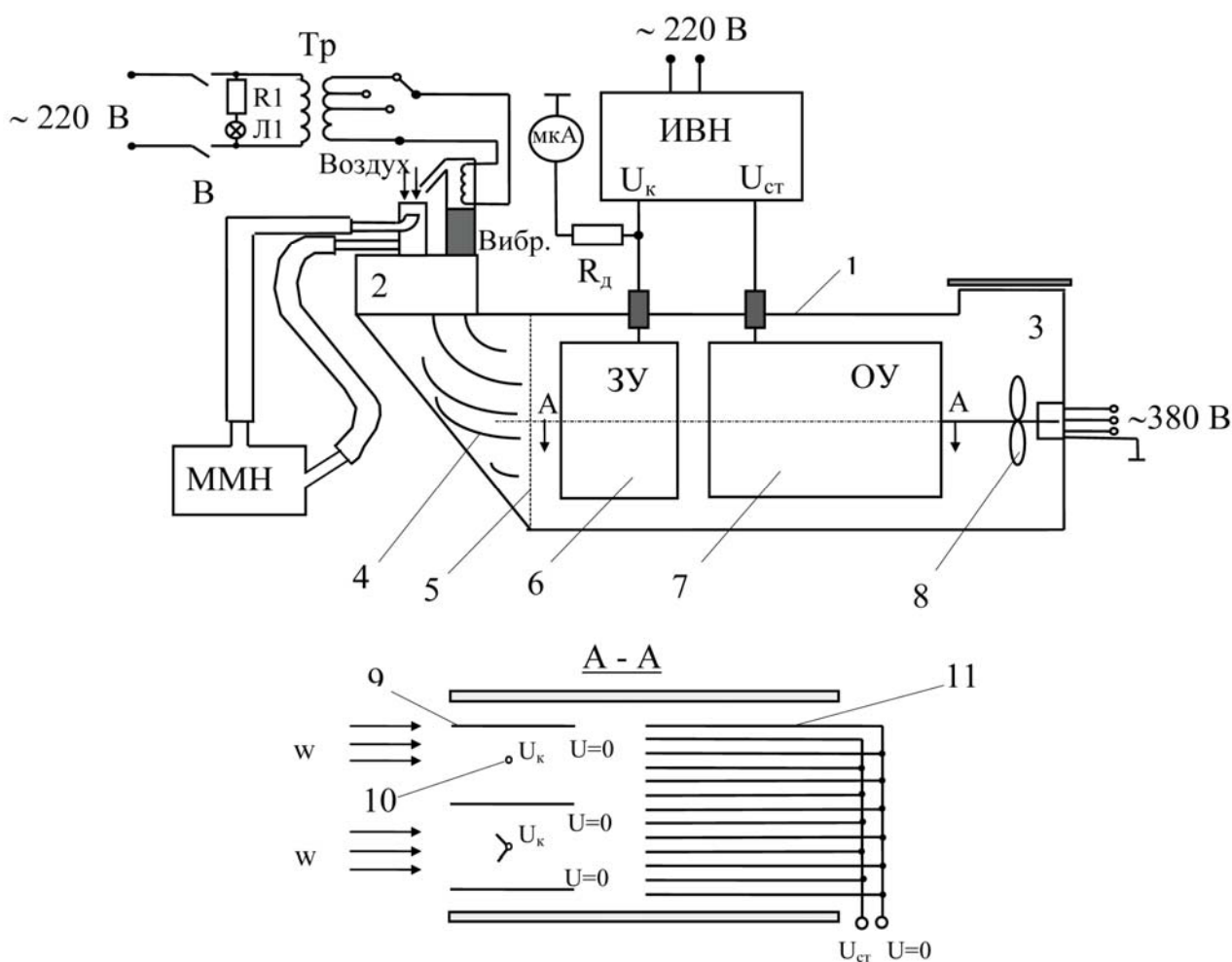


Рис. 6.4. Принципиальная схема установки

В качестве улавливаемой пыли используется порошок ликопидия, состоящий из мелкодисперсных частиц радиусом $15 \cdot 10^{-6}$ м, плотностью $0.6 \cdot 10^3$ кг/м³, $\epsilon=3$.

Подача частиц осуществляется с помощью вибрационного питателя (вibr. на рис. 6.4), обеспечивающего равномерную длительную подачу. Регулировка

производительности осуществляется ступенчато от трансформатора Тр. Включение вибропитателя осуществляется тумблером В, при этом на лицевой панели фильтра загорается лампочка.

Удельное содержание частиц пыли определяется массой M частиц, поступающих в электрофильтр в единицу времени и объемной скоростью газа Q , то есть:

$$m = M/Q. \quad (6.9)$$

Если, известна масса частиц, поступающих в электрофильтр M_1 , и масса частиц, осажденных в электрофильтре M_2 за фиксированный интервал времени можно определить степень очистки $\frac{M_1}{M_2} \cdot 100\%$.

Масса частиц, поступающих в электрофильтр, определяется производительностью вибропитателя и потерями в газоздушном тракте на распределительной решетке (4) и сетке (5). При напряжении на вибропитателе 50 В в зону коронного разряда поступает $M_1=2.3$ мг/с.

Масса частиц, осажденных в электрофильтре, определяется путем измерения массы, осевшей на пробоотборном датчике. Пробоотборный датчик выполнен в виде плоской металлической пластины, которая крепится к осадительному электроду.

Измерив массу датчика до m_g и после m_{g+n} осаждения на нем частиц и беря разницу, можно получить массу m_n частиц, осажденных на датчике за время работы t :

$$m_n = m_{g+n} - m_g, \quad (6.9)$$

тогда масса частиц, осажденных в канале электрофильтра, определяется как:

$$M_2 = \frac{m_n \cdot S_n}{S_g \cdot t}, \quad (6.9)$$

где S_g – площадь датчика, S_n – площадь осадительных пластин одного канала электрофильтра, t – время подачи порошка в электрофильтр – время измерения.

Измерение скорости газа поводится с помощью пневматической трубки (рис. 6.5). Для этого на входной патрубке электрофильтра установлен дополнительный газопровод. В него введена трубка, изогнутая под углом 90° так, чтобы ось ее начальной части совпадала с направлением потока газа, а отверстие было направлено навстречу потоку. Другая трубка установлена заподлицо со стенкой газохода. Обе трубки присоединены к микроманометру ММН. При таком подключении измеряется динамический напор $P_{дин}$ как разница полного P_n и статического $P_{ст}$ напоров:

$$P_{дин} = P_n - P_{ст},$$

а скорость газа определяется по формуле

$$w = \sqrt{\frac{2 g P_{дин}}{\gamma_b}},$$

где $P_{\text{дин}}$ – динамический напор, мм вод. ст.; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность газа, кг/м³, для нормальных атмосферных условий $\gamma_{\text{в}} = 1.2 \text{ кг/м}^3$; g – ускорение свободного падения, равное 9.8 м/с^2 .

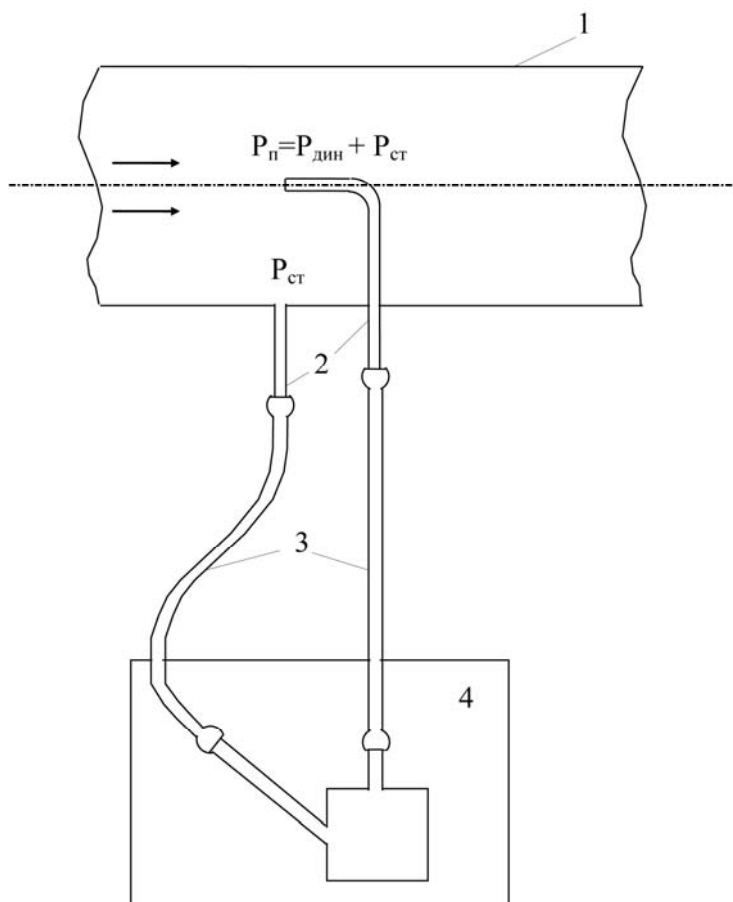


Рис. 6.5. Схема измерения скорости потока в газоходе

1 – газоход; 2 – измерительная трубка; 3 – гибкие шланги; 4 – микроманометр

Динамический напор $P_{\text{дин}}$ определяется как разность показаний микроманометра при включенном h_1 и выключенном h_2 микроманометре, помноженная на коэффициент манометра k (указан на шкале микроманометра):

$$P_{\text{дин}} = (h_1 - h_2)k .$$

4. Порядок проведения экспериментов

1. Засыпать ликоподий в вибропитатель.
2. Взвесить пробоотборник. Закрепить датчик пылеотбора на заземленном осадительном электроде зарядного устройства.
3. Вставить кассету зарядного устройства в корпус. **Внимание!** Обратить внимание на правильность установки зарядной камеры.
4. Запереть дверцу электрофильтра.
5. Включить вентилятор.

6. Включить источник высокого напряжения. Установить необходимое напряжение на коронирующих электродах зарядной камеры.
7. Зафиксировать показания микроманометра при открытом и закрытом клапане.
8. Включить тумблер вибропитателя, начав отсчет времени.
9. Через 5 минут отключить вибропитатель. Отключить источник высокого напряжения. Отключить вентилятор.
10. Открыть дверцу электрофилтра. Вынуть кассету зарядной камеры.
11. Снять пробоотборник с пластин зарядной камеры.
12. Взвесить пробоотборник.
13. Очистить электроды и пробоотборник от осевшей пыли.
14. Повторить опыт начиная с п.1.

5. Задание на предварительную подготовку

1. Изучить описание.
2. Ознакомиться с описанием установки и порядком проведения испытаний.
3. Рассчитать эффективность осаждения частиц ликоподия для следующих условий:
 $2h = 58$ мм, $U = 8, 10$ и 12 кВ, $w = 4.1$ м/с, $a = 15 \cdot 10^{-6}$ м, $l = 78 \cdot 10^{-3}$ м, $\varepsilon = 3$.
 Расчет провести для гладкого провода радиусом $125 \cdot 10^{-6}$ м. Распределения напряженности поля даны на рис. 6.6
4. Подготовить ответы на контрольные вопросы.

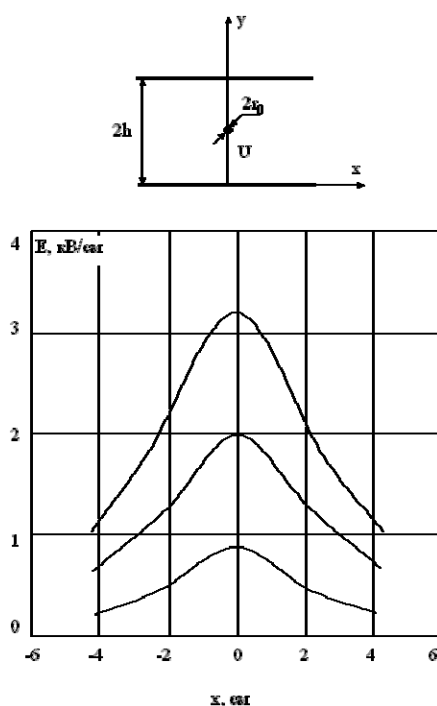


Рис. 6.6. Распределение напряженности электрического поля по поверхности осадительного электрода $y = 0$, $r_0 = 125$ мкм, $h = 29$ мм.

6. Задание на измерения

Цель измерений: исследовать зависимость степени очистки от характерных параметров.

1. Ознакомиться с расположением элементов установки на стенде.
2. Ознакомиться с правилами техники безопасности.
3. Провести измерения осажденной пыли для напряжения $U = 8, 10$ и 12 кВ для гладкого электрода. Взвешивание производить с точностью до четвертого знака, в граммах.
4. По результатам измерений п. 3 построить зависимость эффективности осаждения ликоподия и сравнить с расчетными данными. Объяснить полученные данные.
5. Описать характер осаждения частиц для промежутков с гладким и игольчатым проводом. Объяснить полученный результат.

7. Контрольные вопросы

1. Поясните последовательность проведения измерения.
2. Как степень очистки зависит от приложенного напряжения, скорости потока, длины электрофильтра и параметров частиц?
3. Какие частицы улавливаются в первую очередь: крупные или мелкие?

Литература

Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учеб. для вузов/ И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др.; Под ред. И.П. Верещагина, В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1993, стр. 254-315, 316-318.