

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

И. В. Буторина

**Выбор и расчет газоочистных аппаратов**

Учебное пособие

**Санкт-Петербург**

**2020**

## Содержание

Разновидности пылеочистных аппаратов. Расчет инерционной камеры.....	3
Принцип действия и расчет циклонных аппаратов.....	11
Принцип действия и расчет электрофильтров.....	19
Принцип действия и расчет тканевых фильтров.....	26
Принцип действия и расчет форсуночных скрубберов.....	35

**Разновидности пылеочистных аппаратов.  
Расчет инерционной камеры**

## 1. Цели и задачи

Целью проведения данного практического занятия является ознакомление студентов с основными разновидностями пылеочистных аппаратов и освоение методики расчета простейших пылеулавливающих аппаратов – инерционных камер.

В ходе выполнения данного практического занятия студент должен знать:

- что называется пылеочистным аппаратом;
- классификацию пылеочистных аппаратов;
- чем отличаются мокрые и сухие газоочистные аппараты;
- основными параметрами характеризуются пылеочистные аппараты;
- в каком случае применяют мокрые газоочистные аппараты;
- что понимают под инерционной камерой и принцип ее действия;
- в каких случаях применяют инерционных камеры.

уметь

- выбрать пылеочистной аппарат;
- рассчитать инерционную камеру.

## 2. Классификация пылеочистных аппаратов

Пылеочистными аппаратам называются устройства для выведения пыли из газового потока. Различают сухие и мокрые пылеочистные аппараты.

Сухие аппараты дают возможность очищать газ без применения воды только за счет действия естественных и внешних сил. Сухие аппараты очистки

подразделяются на аппараты инерционного действия, фильтры и электрофильтры.

В мокрых аппаратах, в отличие от сухих, очистка газа от пыли осуществляется с помощью воды. Мокрые аппараты очистки подразделяются на форсуночные скруббера, скруббера Вентури и промыватели различного типа. Основным недостатком этих аппаратов является вторичное загрязнение среды, т. е. образование шлама (воды со взвесью пыли), который необходимо очищать от взвешенных частиц. В связи с этим мокрые пылеочистные аппараты применяют только в случае, когда газ необходимо еще и охладить, а также очистить от растворимых в воде газов.

Основные виды пылеочистных аппаратов, применяемых в металлургической промышленности и их характеристики приведены в таблице 1. С помощью данной таблицы исходя из характеристик пылегазового потока может быть выбран аппарат, обеспечивающий необходимую степень очистки газов.

Таблица 1. Технические характеристики пылеочистных аппаратов

Характеристики	Наименование аппарата					
	Инерционная камера	Циклоны	Тканевые фильтры	Электрофильтры	Форсуночные скрубберы	Скрубберы Вентури
Запыленность газового потока, г/м <sup>3</sup>	—	400	20	50 - 90	-	100
Улавливаемые частицы, мкм	50	20	Субмикронные	1-2	10-15	1-2
Температура, °С	450	450	100-180	330 - 425	900	900
Разрежение в газоходе, кПа	—	2,5		4 - 15		

Характеристики	Наименование аппарата					
	Инерционная камера	Циклоны	Тканевые фильтры	Электро-фильтры	Форсуночные скрубберы	Скрубберы Вентури
Гидравлическое сопротивление, кПа	0,2–0,3	1,2 –2,5	1 –1,8	0,15 –0,2	0,25	10 -20
Расход электроэнергии на 1000 м <sup>3</sup> газа, кВт/час	–	0,2 –0,25	0,4 –0,5	0,5 –1,0	0,15 –0,2	4 – 6
Расход воды, л/м <sup>3</sup>	–	–	–	–	3 – 6	0,12 – 4
*Эффективность в %	<60	95 -98	99,5	99,5	60 -70	96 - 98
*Приведенные в данных таблицах значения эффективности улавливания соответствуют указанному значению улавливаемых частиц						

### 3. Инерционные камеры

Под инерционными аппаратами понимают пылеочистители, использующие силу инерции для выведения пыли из газового потока. Они подразделяются на инерционные камеры и циклоны.

Под инерционной камерой понимают расширение газового канала, оснащенное бункером для сбора пыли. Принцип ее действия основан на выпадении частиц пыли из газового потока при падении скорости в зоне расширения сечения канала, по которому движется поток. В качестве инерционной силы здесь используется сила гравитации.

В зависимости от направления подводы газа инерционные камеры могут быть горизонтальными и вертикальными. Для повышения эффективности очистки, они могут быть оснащены жалюзийными решетками, соударяясь с которыми частицы выпадают в бункер.

Вид простейшей инерционной камеры представлен на рисунке 1.

Под инерционной камерой понимают расширение газового канала, оснащенное бункером для сбора пыли. Принцип ее действия основан на выпадении частиц пыли из газового потока при падении скорости в зоне расширения сечения канала, по которому движется поток. В качестве инерционной силы здесь используется сила гравитации.

В зависимости от направления подводы газа инерционные камеры могут быть горизонтальными и вертикальными. Для повышения эффективности очистки, они могут быть оснащены жалюзийными решетками, соударяясь с которыми частицы выпадают в бункер. Вид простейшей инерционной камеры представлен на рисунке 1.

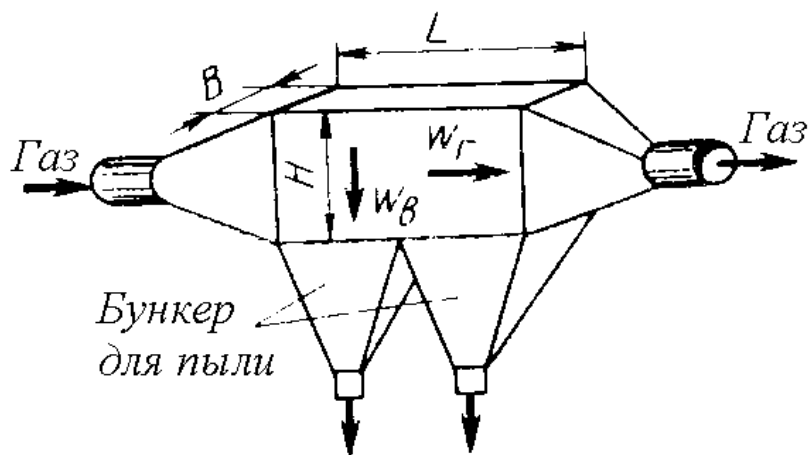


Рис. 1. Инерционная камера

Расчет эффективности улавливания частиц в инерционной камере осуществляется по критическому размеру частиц, которые могут быть уловлены в данном газоочистном аппарате. Эта величина может быть определена исходя из следующих соображений.

Частица, попадающая в инерционную камеру, движется вдоль нее в газовом потоке со скоростью  $W_r$  и одновременно падает вниз со скоростью седиментации  $W_c$ , определяемой по формуле:

$$W_c = \frac{d^2 \rho_p g}{18\mu} \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр частицы;  $\rho_p$  – размер частицы;  $\mu$  – вязкость газа;  $g$  – ускорение свободного падения.

Частица успеет выпасть в бункер, если за время пролета по камере с газовым потоком успеет достичь бункера. В этом случае выполняется равенство

$$\frac{L}{W_r} = \frac{H}{W_c} \quad (2)$$

где  $L$  и  $H$  – соответственно длина и высота инерционной камеры,  $w_r$  – скорость газа определяемая по формуле:

$$w_r = \frac{V}{F} \quad (3)$$

где  $V$  – расход газового потока;  $F$  – площадь поперечного сечения камеры.

Подставив в уравнение (2) уравнение (1) и решив его относительно  $d$ , получим уравнение для расчета диаметра частиц, улавливаемых в данной инерционной камере

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{18\mu w_r H}{L\rho_p g}}, \quad (4)$$

Дисперсный состав пыли обычно задается таблицей, где указывается какую долю в данной массе пыли занимают частицы определенной фракции, или интегральной кривой распределения частиц по размерам, где на оси абсцисс откладывается диаметр частиц, а на оси ординат сумма долей данной и каждой предыдущей фракции.

По данной кривой определяется доля частиц пыли критического размера



( $q_{кр}$ ) и полагая, что все частицы большего размера тоже успевают осесть в инерционной камере, эффективность улавливания пыли в инерционной камере определяют по формуле

$$\eta = 1 - q_{кр} \quad (4)$$

Из-за низкой эффективности улавливания частиц, которая для крупнодисперсной металлургической пыли даже при значительной длине камеры не превышает 50 %, инерционные камеры применяются только в качестве первой ступени очистки газов от пыли.

#### 4. Расчетное задание

1. Определить эффективность улавливания пыли, дисперсный состав которой приведен в таблице 2, в рабочей камере длиной 5 м, при расходе очищаемого газа 1 м<sup>3</sup>/с, вязкости газа 17 · 10<sup>-6</sup> Па·с, размерах камеры L·B·H=5·2·2 м, и плотность пыли 5100 кг/м<sup>3</sup>.

**Таблица 2. Дисперсный размер пыли**

№ п/п	Размер частиц, мкм					
	<1	1-5	5-10	10-30	30-60	60-100
1	1	5	10	25	40	19
2	2	6	11	45	25	11
3	3	7	12	22	45	11
4	4	8	13	45	20	10
5	5	10	14	24	35	12
6	6	20	15	25	30	4
7	7	15	25	40	10	3
8	8	20	30	25	12	5

9	9	50	18	15	7	1
10	2	10	20	38	20	10
11	1	5	10	25	40	19
12	2	6	11	45	25	11
13	3	7	12	22	45	11
14	4	8	13	45	20	10
15	5	10	14	24	35	12
16	6	20	15	25	30	4
17	7	15	25	40	10	3
18	8	20	30	25	12	5
19	9	50	18	15	7	1
20	2	10	20	38	20	10

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАСЧЕТ  
ЦИКЛОННОГО АППАРАТА**

## **1. Цели и задачи**

Целью проведения данного практического занятия является ознакомление студентов с инерционными пылеочистителями типа «циклон» и методикой расчета подобных аппаратов.

В результате выполнения данной работы студент должен

знать

- что понимают под пылеочистным аппаратом;
- классификацию пылеочистных аппаратов;
- что понимают под пылеочистными аппаратами инерционного действия;
- какой тип пылеочистных аппаратов относится к циклонам;
- принцип действия циклонных аппаратов;
- разновидности циклонных аппаратов;
- что понимают под расчетом циклонных аппаратов;

уметь

- выбрать необходимый циклонный аппарат;
- рассчитать циклонный аппарат.

## **2. Принцип действия циклонного аппарата**

Инерционными пылеочистными аппаратам называются аппараты, принцип действия которых основан на использовании инерционных сил. Аппараты, в которых в качестве инерционной используется центробежная сила, называются циклонами.

Циклонные аппараты по форме рабочей камеры подразделяются на цилиндрические и конические, а по компоновке на одиночные, групповые и батарейные.

Наиболее распространенным типом циклонных аппаратов являются цилиндрические циклоны. Принципиальная схема цилиндрического циклона представлена на рисунке 1

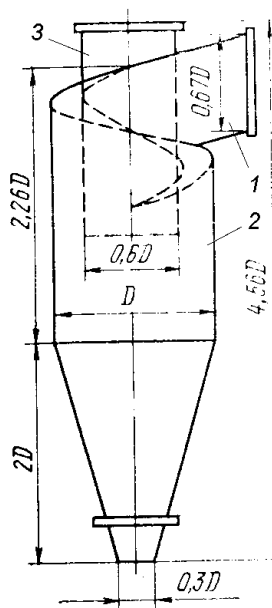


Рисунок 1. Циклон серии ЦН с указанием оптимальных размеров: 1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – выходной патрубок

. Рабочая камера цилиндрического циклона состоит из удлиненной цилиндрической части и относительно короткой конической части ( в конических циклонных аппаратах наоборот) К цилиндрической части рабочей камеры тангенциально и под небольшим углом к горизонту крепится входной патрубок. Выходной патрубок заглублен в цилиндрическую часть рабочей камеры и установлен соосно с ней. Выходное отверстие конической части соединяется с бункером для сбора пыли.

Принцип действия циклонов следующий. Газовый поток, проходя через тангенциально установленный патрубок (1), закручивается в цилиндрической части циклона ( 2 ). Вместе с ним во вращательном движении участвуют пылевые частицы, которые под действием центробежной силы начинают двигаться к стенкам циклона, а за счет силы тяжести и наклонного входа патрубка одновременно опускаться вниз. Достигнув стенок циклона, пылевые

частицы ссыпаются по ним в бункер, а очищенный газовый поток покидает корпус циклона через выходной патрубок. Бункер циклона время от времени очищается от пыли. Для обеспечения эффективной работы циклона необходимо:

- соблюдать строгое соотношение между основными размерами отдельных частей циклонного аппарата ( рис 1);
- обеспечить герметичность всей конструкции;
- не допускать зарастания рабочей камеры циклона пылью;
- не допускать подъема уровня пыли в бункере выше трех диаметров выходного отверстия конической части рабочей камеры.

-

### 3. Расчет циклонного аппарата

При расчете циклона определяют его основные геометрические размеры, эффективность улавливания пыли и величину гидравлического сопротивления.

Расчет геометрических размеров циклона начинают с определения диаметра цилиндрической части рабочей камеры

$$D = \sqrt{\frac{4V}{\pi w_r}} \quad (1)$$

где  $V$ - расход очищаемого газа;  $w_r$ - скорость газа в живом сечении циклона, которая принимается равной 3,5 м / с.

В случае если расчетный диаметр циклона превышает 500 мм, целесообразно установить группу циклонов или батарейный циклон, т. к работа одиночного циклона большого диаметра не эффективна. Далее по соотношениям, указанным на рисунке 1, рассчитываются остальные линейные размеры циклона

Расчет эффективности работы циклона задача сложная. С наибольшей степенью точности она может быть рассчитана с помощью методики разработанной для циклонов конструкции НИИОгаза типа ЦН и СК-ЦН .

Согласно данной методике эффективность улавливания пыли в циклоне рассчитывается по формуле

$$\eta = f(X) \quad (2)$$

Здесь X- функция многих переменных, определяемая по формуле:

$$X = \frac{\lg \frac{d_{50}}{d_{50}^1}}{\sqrt{\lg^2 \sigma + \lg^2 \sigma_q}} \quad (3)$$

где  $d_{50}$  и  $\sigma_q$  – соответственно медианный размер и дисперсия улавливаемой пыли;  $\sigma$  - дисперсия экспериментальной пыли, логарифм этой величины в зависимости от типа циклона определяется по таблице 1.

**Таблица 1. Значения поправочных коэффициентов**

Тип циклонного аппарата	$d_{50}^T$	$Lg^2 \sigma$	$K_1$	$K_2$	$\zeta_{500}$
ЦН-15	4,5	0,352	1 -*0,9 (бат)	1	163
СК ЦН–34	1,95	0,308	1-*0,9 (бат)	1	1150
* коэффициент для батарейного циклона					

Величина  $d_{50}^1$  рассчитывается по формуле

$$d_{50}^1 = \frac{d_{50}^T}{\sqrt{\frac{5,07 * 10^8 D \mu}{\rho_q \omega_{Ц}}}} \quad (4)$$

где  $d_{50}^T$  – экспериментальная величина, зависящая от типа циклона; D– диаметр циклона;  $\mu$  – вязкость газа;  $\rho_q$  – истинная плотность частиц;  $\omega_{Ц}$  – скорость газа в циклоне, оптимальная величина которой, для большинства циклонов, равна 3, 5 м/с.

Величина дисперсии пыли

$$\sigma = \frac{d_{84,1}}{d_{50}} \quad (5)$$

где  $d_{84,1}$  - диаметр частиц, доля которых в данной пыли составляет 84,1 процента. Как и  $d_{50}$  эта величина определяется по интегральной кривой распределения частиц по размеру.

При рассчитанной величине  $X$  значение эффективности улавливания пыли в циклоне  $f(X)$  определяется по табличным значениям (таблица 2).

Величина потерь энергии на преодоление местного сопротивления, которое создает циклонный аппарат, может быть рассчитана по уравнению

$$\Delta P = \zeta \frac{\overline{w}_u^2}{2} \quad (6)$$

где  $\zeta$  – коэффициент местного сопротивления для циклонов серии ЦН рассчитываемый по формуле

$$\zeta = K_1 K_2 \zeta_{500} + K_3 \quad (7)$$

Все входящие в это выражение величины - экспериментальные коэффициенты, зависящие от типа циклона и других факторов:  $\zeta_{500}$  – коэффициент сопротивления циклона диаметром 500 мм;  $K_1$ – коэффициент учитывающий влияние циклона, он изменяется в диапазоне 0,85-1;  $K_2$ – коэффициент учитывающий запыленность газов изменяется в диапазоне 0,85-1;  $K_3$ – коэффициент учитывающий групповую компоновку циклонов . Для одиночного циклона  $K_3 = 0$ , при двухрядной компоновке  $K_3 = 35$ , а при круговой – 60.

В металлургической промышленности чаще всего применяют циклоны типа ЦН –15 и СК ЦН 34. Значение эмпирических коэффициентов, необходимых для расчета этих циклонов, приведены в таблице 1.

Эффективность работы циклонов зависит от его конструкции и физических свойств улавливаемой пыли. При улавливании мелкодисперсной металлургической пыли величина его эффективность составляет 20-80 %, в связи с чем , циклонные аппараты в металлургическом производстве могут использоваться только в качестве первой ступени очистки. Степень очистки



газов в батарейных циклонах на 20% ниже, чем в одиночных циклонах такого же диаметра.

#### 4. Расчетное задание

Расчитать циклонный аппарат типа СК ЦН для очистки газов, отходящих от аспирационной системы подбункерного помещения доменной печи, если расход газов составляет 20 м<sup>3</sup>/с, вязкость  $17 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с, температура 20<sup>0</sup> С, плотность пыли 5100 кг/м<sup>3</sup>, дисперсный состав пыли приведен в таблице 3.

В таблице 3 в вертикальных столбцах приведены значения процентного содержания пыли данного дисперсного состава в навеске.

**Таблица 3. Дисперсный состав пыли**

№ п/п	Диаметр частиц, мкм					
	<1	1-5	5-10	10-30	30-60	60-100
1	1	5	10	25	40	19
2	2	6	11	45	25	11
3	3	7	12	22	45	11
4	4	8	13	45	20	10
5	5	10	14	24	35	12
6	6	20	15	25	30	4
7	7	15	25	40	10	3
8	8	20	30	25	12	5
9	9	50	18	15	7	1
10	2	10	20	38	20	10
11	3	11	21	38	14	10
12	5	11	15	30	17	5

13	1	5	10	25	40	19
14	2	6	11	45	25	11
15	3	7	12	22	45	11
16	4	8	13	45	20	10
17	5	10	14	24	35	12
18	6	20	15	25	30	4
19	7	15	25	40	10	3
20	8	20	30	25	12	5
21	9	50	18	15	7	1
21	2	10	20	38	20	10
23	3	11	21	38	14	10
24	5	11	15	30	17	5

## **Принцип действия и расчет электрофильтров**

## 1. Цели и задачи

Целью проведения данного практического занятия является ознакомление студентов с пылеочистными аппаратами типа электрофильтр и методикой расчета подобных устройств.

В результате выполнения данной работы студент должен  
знать

- что понимают под электрофильтрами;
- основные конструктивные элементы электрофильтра;
- принцип действия электрофильтров;
- разновидности электрофильтров;
- что понимают под расчетом электрофильтров;
- ограничения для использования электрофильтров;

уметь

- выбрать и рассчитать электрофильтр.

## 2. Принцип действия электрофильтра

Электрофильтрами называются газоочистные устройства, принцип действия которых основан на выведении пылевых частиц из газового потока за счет электростатических сил. Электрофильтр состоит из коронирующего и осадительного электрода. При подаче напряжения на коронирующий электрод вокруг него создается коронный разряд, который ионизирует воздух. Отрицательно заряженные газовые ионы оседают на пылевых частицах, сообщая им электрический заряд. Под действием кулоновских сил отрицательно заряженные частицы притягиваются к положительно заряженному осадительному электроду и покидают газовый поток.

Коронирующие электроды чаще всего выполняют в виде тонкой проволоки, а осадительные в виде пластин или труб. Электроды заключаются в корпус, оснащенный входным и выходным газовыми патрубками, а также бункером для сбора пыли. В металлургической промышленности наибольшее распространение получили пластинчатые электрофильтры.

Электрофильтры отличаются высокой эффективностью улавливания пыли (99 - 99,9 %) и низкими энергозатратами на осуществление этого процесса.

### 3. Расчет электрофильтра

Расчет электрофильтра заключается в определении его пропускной способности, эффективности работы, потребляемой мощности на создание коронного заряда и силы тока, подаваемой на коронирующие электроды.

Пропускную способность электрофильтра определяют по величине площади активного сечения, которая рассчитывается по формуле:

$$F_A = \frac{V_{ГР}}{w_{Г}} \quad , \quad (1)$$

где  $V_{ГР}$  – расход газа при рабочих условиях;  $w_{Г}$  – скорость газа в электрофильтре, за оптимальное значение которой принимается величина  $w=1 - 1,5$  м/с. По величине площади активного сечения с помощью специальных таблиц выбирают электрофильтр заданной конструкции.

С определенной степенью точности эффективность работы электрофильтров может быть рассчитана по уравнению:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2w_{д}L}{w_{Г}H}\right) \quad , \quad (2)$$

где  $w_{Г}$  – скорость движения газа в;  $w_{д}$  – скорость дрейфа заряженных частиц к осадительным электродам;  $L$  – длина активного поля осадительных

электродов;  $H$  – в пластинчатом фильтре межэлектродное расстояние, а в трубчатых фильтрах - диаметр осадительного электрода.

Скорость дрейфа частиц, размер которых соизмерим с длиной свободного пробега молекул газа ( $\lambda = 10^{-7}$ ), рассчитывается по формуле

$$w_{\text{д}} = 0,17 * 10^{-11} \frac{E(1 + 0,815 * 10^{-7} / r)}{\mu}, \quad (3)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля электрофильтра;  $r$  – радиус улавливаемых частиц;  $\mu$  – вязкость газа.

Для крупных аэрозольных и пылевых частиц скорость дрейфа определяется с помощью уравнения

$$w_{\text{д}} = 0,118 * 10^{-10} \frac{E^2 r}{\mu} \quad (4)$$

Расчет эффективности электрофильтра производится для каждой фракции пыли отдельно, а затем определяется суммарная величина эффективности работы аппарата

$$\eta = \sum q_i \eta_i \quad (5)$$

где  $q_i$  – доля пыли данной фракции;  $\eta_i$  – эффективность улавливания пыли данной фракции в электрофильтре.

Величина напряженности поля в электрофильтре зависит от конструкции фильтра, межэлектродного расстояния, радиуса коронирующих электродов и подвижности ионов. Рабочий диапазон напряженности поля электрофильтра составляет  $E=150- 500$  кВ/м.

Потери энергии на гидравлическое трение в электрофильтре величина не расчетная, они принимаются равными  $\Delta P = 200$  Па. Потребляемая мощность на создание коронного разряда может быть определена по уравнению

$$N_K = i_o F_A U, \quad (6)$$

где  $i_o$  – сила тока, отнесенная к единице активной поверхности фильтра ( $\text{мА}/\text{м}^2$ );  $U$ – приложенное напряжение. Величина  $i_o$  при улавливании в электрофильтре металлургической пыли может быть рассчитана по уравнению

$$i_o = 0,5E^2r^2 \quad (7)$$

где  $r$ – размер улавливаемых частиц.

Размер межэлектродного расстояния -  $H$  зависит от конструкции фильтра. Для большинства фильтров эта величина равна 0,25- 0,4 м. Длина осадительных электродов может подбираться по необходимой степени улавливания пыли.

Электрофильтры не рекомендуется использовать для улавливания пыли проводников и диэлектриков. Пылевидные частицы с хорошей проводимостью быстро хорошо заряжаются, но и быстро разряжаются, отдавая свой заряд осадительному электроду, после чего могут быть унесены газовым потоком. Частицы пыли диэлектриков, оседая на осадительном электроде, уменьшают его заряд и способствуют возникновению обратной короны, ухудшающей работу электрофильтра. Электрофильтры имеют также ограничения по температуре очищаемого газового потока (не более  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и степени запыленности потока (не более  $60\text{ г}/\text{м}^3$ ).

#### 4. Расчетное задание

Рассчитать электрофильтр типа ЭГА для улавливания пыли сталеплавильной пыли, характеристики которой приведены в таблице 1, если напряженность электрического поля  $E=250$  кВ/м; коэффициент  $A=1,4$ ; длина свободного пробега молекул газа  $\lambda = 10^{-7}$  м; расход газа  $28$  м<sup>3</sup>/с; расстояние между электродами осадительным и коронирующим электродами  $H=70$  мм; длина активного поля  $L=3,85$  м; вязкость газа  $\mu = 17 \cdot 10^{-6}$  Па\*с; приложенное напряжение  $U= 80$  кВ. Построить график зависимости эффективности работы фильтра от размера частиц улавливаемой пыли.

Таблица 1. Дисперсный состав пыли

№ п/п	Размер частиц, мкм					
	<0,3	0,3- 0,5	0,5-1	1-2	2-5	5- 10
1	1	5	10	25	40	19
2	2	6	11	45	25	11
3	3	7	12	22	45	11
4	4	8	13	45	20	10
5	5	10	14	24	35	12
6	6	20	15	25	30	4
7	7	15	25	40	10	3
8	8	20	30	25	12	5
9	9	50	18	15	7	1
10	2	10	20	38	20	10
11	1	5	10	25	40	19
12	2	6	11	45	25	11
13	3	7	12	22	45	11
14	4	8	13	45	20	10



15	5	10	14	24	35	12
16	6	20	15	25	30	4
17	7	15	25	40	10	3
18	8	20	30	25	12	5
19	9	50	18	15	7	1
20	2	10	20	38	20	10
21	5	10	14	24	35	12
22	6	20	15	25	30	4
23	7	15	25	40	10	3
24	8	20	30	25	12	5

## **Принцип действия и расчет тканевых фильтров**

## 1.Цели и задачи

Целью проведения данного практического занятия является ознакомление студентов с матерчатыми фильтрами и методикой расчета подобных аппаратов.

В результате выполнения данной работы студент должен

### **знать**

- что понимают под пылеочистными аппаратами фильтрационного действия;
- разновидности фильтрационных аппаратов;
- принцип действия фильтров;
- устройство матерчатых фильтров;
- что понимают под расчетом матерчатых фильтров;
- проблемы использования матерчатых фильтров на металлургических предприятиях.

### **уметь**

- рассчитать матерчатый фильтр.

## 2.Фильтры и их разновидности

Пылеочистные аппараты фильтрационного действия (фильтры) обеспечивают улавливание частиц аэрозоли за счет ситового эффекта и эффекта зацепления пылевых частиц за волокна или зерна фильтрующей перегородки. Различают матерчатые и зернистые фильтры. К классу матерчатых фильтров относятся аппараты, где в качестве фильтрующей перегородки используют тканый или нетканый материал. Под зернистыми фильтрами понимают аппараты, в которых фильтрация газов осуществляется через зернистую перегородку. Наибольшее распространение получили матерчатые фильтры. По форме фильтрующей перегородки они классифицируются на , карманные

и зигзагообразные фильтры. Матерчатые фильтры отличаются высокой эффективностью действия и могут улавливать частицы пыли субмикронных размеров, благодаря чему в последнее время они все чаще применяются в промышленности для очистки газов от мелкодисперсной пыли. Общий вид рукавных фильтров приведен на рисунке 1.

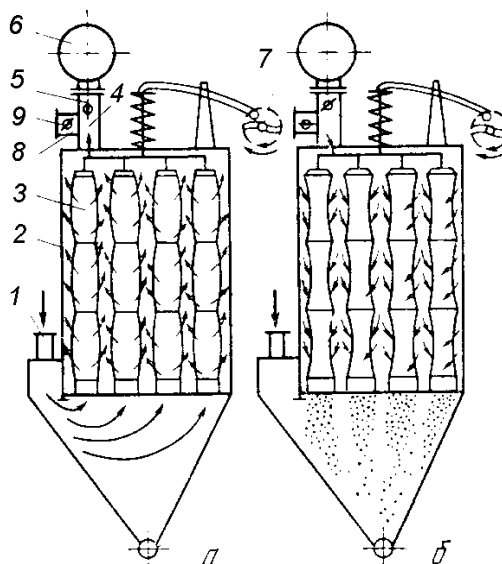


Рисунок 1. Рукавный фильтр: а) период продувки, б) период регенерации.

1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – фильтрующие элементы;  
4 – выходной патрубок; 5 – клапан; 6 – газоход; 7 – встряхивающее устройство; 8 – патрубок; 9 – клапан.

Очистка газов в рукавных фильтрах осуществляется по следующей схеме. Запыленный газ через патрубок (1), входит в корпус фильтра (2). Фильтруясь через матерчатые рукава (3), он через выходной патрубок (4), оснащенный отсекательным клапаном (5), выходит в трубопровод чистого газа (6). Регенерация ткани фильтра осуществляется либо путем встряхивания фильтрующих элементов с помощью встряхивающего устройства (7), либо путем обратной продувки рукавов сжатым воздухом, подаваемым через патрубок (8), при закрытом клапане (5) и открытом (9).

Карманные фильтры, отличаются от рукавных формой фильтрующей перегородки. Она представляет собой проволочный каркас с натянутой на них тканью. Главным достоинством таких фильтров являются компактные размеры.

Для изготовления фильтрующей перегородки используют как тканые, так и нетканые, волокнистые материалы, изготовленные из натуральных и искусственных волокон. Естественные волокна: хлопок, лен, шелк и шерсть имеют низкую износостойкость и термостойкость (до 80<sup>0</sup>С), вследствие чего они используются крайне редко. Искусственные материалы типа нейлон, нейлон, тефлон выдерживают температуру фильтруемого газа до 130 - 180<sup>0</sup> С и устойчивы к истиранию и воздействию агрессивных сред. Новые поколения матерчатых фильтров имеют фильтрационную перегородку, выполненную из искусственных тканей.

### 3. Расчет матерчатых фильтров

Расчет матерчатого фильтра заключается в определении величины фильтрующей поверхности и величины гидравлического сопротивления фильтра. Расчет эффективности улавливания пыли в тканевых фильтрах - задача крайне сложная, в связи с этим этой величиной обычно задаются по паспортным данным конкретного аппарата. Величина эффективности тканевого фильтра может быть принята равной 99,9 %.

Расчет величины фильтрующей поверхности матерчатого фильтра осуществляется по формуле

$$F = \frac{V_{\phi}}{w_{\phi}} \quad (1)$$

где  $V_{\phi}$ - объем фильтруемого газа;  $w_{\phi}$ - скорость фильтрации (м<sup>3</sup>/с) или удельная нагрузка на фильтр (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>с).

Для определения объема фильтруемого газа вначале надо найти рабочий объем очищаемых газов, по заданному объему газа при нормальных условиях по уравнению Клайперона

$$V_{po} = V_{ny} \frac{TP_o}{T_0P} \quad (2)$$

где  $V_{ny}$ - объем очищаемых газов при нормальных условиях ( $Vp+Vo$  для задачи по порошкам);  $T$  и  $T_0$ —соответственно рабочая температура газа на входе в газоочистку и температура газа при нормальных условиях (273 К);  $P$  и  $P_o$  – давление газа на входе в газоочистку и нормальное давление газа (можно принять одинаковыми).  $T$  – температура, установившаяся в машине распыления в С.

Если рабочая температура газа превышает допустимую температуру фильтрации через данный фильтр, газ следует охладить. Охлаждение газа до необходимой температуры осуществляется либо путем разбавления его воздухом, либо с помощью теплообменников. В случае высокой температуры газа путем совместного использования этих способов охлаждения.

В случае водяных разбавления очищаемых газов воздухом его объем увеличится и может быть рассчитан по формуле

$$V_{po}^{T_\phi} = V_{po} \left(1 + \frac{T - T_\phi}{T_\phi - T_B}\right) \quad , \quad (3)$$

где  $V_{po}^{T_\phi}$ - рабочий объем очищаемого газа при допустимой для данного фильтра температуре  $T$  ,  $T_\phi$ ,  $T_B$ - соответственно рабочая температура газа на входе в газоочистку, допустимая температура фильтрации ( $T_\phi=140$  С) и температура воздуха, подаваемого на разбавление газа.

Регенерация (очистка поверхности фильтра) осуществляется либо путем встряхивания, либо путем обратной продувки чистым воздухом. При регенерации фильтровальной поверхности обратной продувкой, объем очищаемых газов увеличивается на 15-20 %, т. е. объем газов, подаваемых на регенерацию будет равен

$$V_{pez} = 0,2V_{po} \quad (4)$$

С учетом рабочей температуры газа, объема воздуха на его разбавление и объема воздуха подаваемого на регенерацию объем фильтруемого газа определится как

$$V_{\phi} = V_{po}^{T_{\phi}} + V_{pez} \quad (5)$$

После определения объема фильтруемого газа, по формуле (1) определяют площадь фильтрации, а по ее величине по каталогу определяют тип фильтра, учитывая применяемую в нем удельную нагрузку ( $\text{м}^3/\text{м}^2\text{с}$ ), которая указывается в каталоге.

Для обеспечения высокой эффективности улавливания пыли в матерчатых фильтрах, скорость фильтрации газа через перегородку должна быть оптимальной, учитывающей тип ткани, вид улавливаемой пыли, способ регенерации фильтрующей поверхности. Мировая практика эксплуатации таких фильтров показывает, что скорость фильтрации лежит в пределах 0,004-0,04 м/с. Для выбранного фильтра она указана в каталоге.

Гидравлическое сопротивление тканевого фильтра складывается из гидравлического сопротивления аппарата и сопротивления фильтрующей перегородки

$$\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_{II} \quad , \quad (6)$$

Величина гидравлического сопротивления корпуса аппарата вычисляется по формуле:

$$\Delta P_A = \zeta \frac{\omega_{ex}^2 \rho_{\Gamma}}{2} \quad , \quad (7)$$

где  $\zeta$  - коэффициент местного сопротивления корпуса тканевого фильтра, который принимается равным 1,5-2,5;  $\omega_{ex}$  - скорость газа на входе в фильтр, принимаемая обычно равной 10-15 м/с.

Гидравлическое сопротивление фильтровальной перегородки может быть представлено суммой двух слагаемых

$$\Delta P_{II} = \Delta P_T + \Delta P_{СП} \quad , \quad (8)$$

В этом уравнении первое слагаемое представляет собой постоянное сопротивление фильтровальной ткани, а второе – переменное сопротивление осевшего слоя пыли.

Значение гидравлического сопротивления ткани может быть найдено по формуле

$$\Delta P_T = A\mu\omega_\phi \quad (9)$$

где А- коэффициент зависящий от свойств улавливаемой пыли и типа фильтровальной ткани;  $\omega_\phi$  - скорость фильтрации, которая зависит от вида улавливаемой пыли, способа регенерации ткани, начальной запыленность газов и дисперсного состава пыли.

При ориентировочных расчетах тканевого фильтра из искусственной ткани типа лавсан для очистке газов металлургического производства величина принимается равной  $A=2,4 \cdot 10^9 \text{ м}^{-1}$ ;  $\omega_\phi=0,014 \text{ м/с}$ . Фильтрация газов при использовании ткани лавсан осуществляется при температуре газа не выше  $130^\circ\text{C}$ . В диапазоне температур  $20-130^\circ\text{C}$  вязкость большинства дымовых газов составляет  $17,9 \cdot 10^{-6} - 25 \cdot 10^{-6} \text{ н} \cdot \text{с/м}^2$ , откуда  $\Delta P_T = 601-840 \text{ Па}$ .

Величина гидравлического сопротивления слоя пыли зависит от множества факторов: порозности ткани и пыли, размера улавливаемых частиц и их плотности, скорости фильтрации, начальной запыленности газов и времени межрегенерационного периода. В упрощенных расчетах принимается, что для пыли испарения  $\Delta P_{СП} = 600-800 \text{ Па}$ , а для крупной пыли дробления  $\Delta P_{СП} = 200 - 350 \text{ Па}$ . Таким образом, суммарное сопротивление рукавного фильтра, работающего на металлургической пыли может достигать значений  $1000 - 1800 \text{ Па}$ .

Широкое распространение рукавных фильтров в металлургической промышленности сдерживается необходимостью очищать большие объемы газов. Для обеспечения низкой скорости фильтрации больших объемов газа площадь фильтрации должна быть велика, что увеличивает габаритные



размеры газоочистного аппарата. При отсутствии свободных площадей на действующих предприятиях, размещение габаритных матерчатых фильтров задача сложная. В связи с этим, для использования матерчатых фильтров для очистки газов металлургического производства, прежде всего, необходимо обеспечить сокращение объемов отходящих газов. Это может быть достигнуто проведением ряда мероприятий: герметизацией оборудования и газовых трактов, охлаждением газа в теплообменниках, работой агрегатов без дожигания горючих газов в газоходах, а также использованием системы встряхивания для регенерации фильтровальной ткани.

#### 4. Расчетное задание

Рассчитать рукавный фильтр типа ФРКИ, работающий при температуре фильтрования  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , задавшись исходными данными из таблицы 2., принимая барометрическое давление  $P_{\text{бар}}=101,3\text{ кПа}$ , разрежение перед фильтром  $P=300\text{ Па}$ , динамический коэффициент вязкости газов  $\mu =17,9 \cdot 10^{-6}\text{ Нс/м}^2$ . Выбрать подходящий для этих условий фильтр, и определить его габаритные размеры.

**Таблица 1 Расчетные параметры**

Параметр	Варианты задачи									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	2,0	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Температура газа (Т <sub>1</sub> ) °С	200	250	280	300	320	350	380	400	420	440

Параметр	Варианты задачи									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	7	7,5	8	8,5	9	9,5	5	5,5	6	6,5
Температура ° C (T <sub>1</sub> )	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640

Параметр	Варианты задачи									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	2,0	2,5	3	3,5	4	4,5				
Температура ° C (T <sub>1</sub> )	640	660	680	700	720	740				

## **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РАСЧЕТ ФОРСУНОЧНЫХ СКРУББЕРОВ**

## **1.Цели и задачи**

Целью проведения данного практического занятия является ознакомление студентов с форсуночными скрубберами и методикой расчета подобных аппаратов.

В результате выполнения данной работы студент должен

знать

- что понимают под мокрыми пылеочистными аппаратами;
- какой аппарат называется форсуночным скруббером;
- устройство форсуночных скрубберов;
- принцип действия форсуночных скрубберов;
- что понимают под высоконапорными скрубберами;
- что понимают под расчетом форсуночных скрубберов;

уметь

- выбрать и рассчитать форсуночный скруббер.

## **2.Принцип действия форсуночных скрубберов**

Мокрыми пылеочистными аппаратами называются аппараты, в которых для очистки газов используется вода. Наиболее распространенным типом мокрых пылеуловителей является форсуночный скруббер. Принцип действия форсуночного скруббера основан на оседании частиц пыли на каплях жидкости, с последующим выпадением последних под действием силы тяжести в шламоприемник.

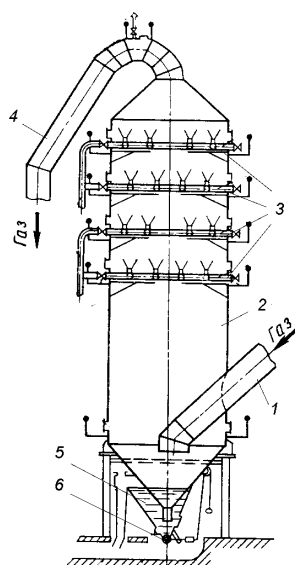


Рис. 3.10. Форсуночный скруббер. 1 – входной патрубок; 2 – корпус; 3 – форсунки; 4 – выходной патрубок; 5 – шламособорник; 6 – клапан выпуска

Принципиальная схема форсуночного скруббера представлена на рисунке 1. Он состоит из патрубка для подачи грязного газа (1); герметичного корпуса (2), со встроенной системой распыления жидкости с помощью форсунок (3) и патрубка для отвода очищенного газа (4), шламприемник (5) с клапаном выпуска (6). Загрязненный газовый поток подается в форсуночный скруббер навстречу падающим каплям жидкости. Пылевые частицы, оседая на каплях, падают вместе с ними в шламприемник, откуда через переливной клапан сливаются в шламопровод.

В последнее время получили распространение форсуночные скруббера, работающие в испарительном режиме. Такой режим работы скрубберов обеспечивается подачей в скруббер воды под высоким напором, что обеспечивает высокую степень распыления жидкости, вследствие чего она превращается в туман. Большая удельная поверхность капель жидкости обеспечивает высокий контакт с пылью и повышает степень ее коагуляции (укрупнения), благодаря чему частицы легко выпадают из газового потока не в виде шлама, а в виде увлажненной пыли. Кроме того, за счет большой

удельной поверхности капли испаряются уже в пределах корпуса скруббера и на выходе из него в газе содержатся только пары жидкости. За счет скрытой теплоты испарения эффективность охлаждения жидкости в высоконапорных скрубберах на порядок больше, чем в обычных. Такой способ очистки и охлаждения газов называется мокро-сухим, так как, несмотря на использование воды, шлам в них не образуется. Высоконапорные скруббера обеспечивают высокую степень очистки газа и эффективное его охлаждение при малом расходе воды.

### 3. Расчет форсуночных скрубберов

Расчет скрубберов заключается в определении эффективности очистки, расхода жидкости на очистку, параметров газового потока на выходе их скруббера (объема и температуры газа) и геометрических размеров скруббера.

Аналитический способ расчета эффективности работы мокрых пылеочистных аппаратов не точен, в связи с этим расчет степени очистки газов в нем ( $\eta$ ) для них осуществляют энергетическим методом по формуле:

$$\eta = 1 - \exp(-BK_{\text{ч}}^{\chi}) \quad (1)$$

где  $B$  и  $\chi$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида улавливаемой пыли. Значения этих коэффициентов для металлургической пыли приведены в таблице 1.

Входящий в уравнение (1) параметр  $K_{\text{ч}}$  – носит название расхода энергии на обработку жидкостью определенного объема газа. Он рассчитывается по уравнению:

$$K_{\text{ч}} = \Delta P_{\text{ан}} + P_{\text{жс}} \frac{10^{-3} M_{\text{жс}}}{V_{\Gamma}} \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{ап}}$  – гидравлическое сопротивление пылеулавливающего аппарата, принимаемое равным 250 Па;  $p_{\text{ж}}$  – заданное давление распыляемой жидкости;  $V_{\text{г}}$  – расход газов при нормальных условиях;  $M_{\text{ж}}$  – массовый расход жидкости на аппарат (кг/с).

**Таблица 1. Характеристики некоторых видов металлургической пыли**

№	Вид пыли	В	$\chi$
1	Агломерационная	0,00661	0,891
2	Доменная	0,00661	0,891
3	Конвертерная	0,0988	0,4663
4	Электродуговая		

Расход воды на обработку газа в форсуночном скруббере определяют балансовым методом по количеству жидкости, которую необходимо подать в скруббер, чтобы обеспечить охлаждение газа до заданной температуры

$$M_{\text{ж}} = \frac{Q}{\varphi(i_{\text{н}} - i_{\text{п}}) + (1 - \varphi)(i_{\text{к}} - i_{\text{п}})}, \quad (3)$$

$Q$  – количество тепла отнимаемого от газов в скруббере, определяемое по формуле (4);  $\varphi$  – коэффициент испарения (для низконапорных скрубберов принимаемый равным = 0,5, а для высоконапорных равным = 1);  $i_{\text{п}}$  – начальная энтальпия пара;  $i_{\text{н}}$  и  $i_{\text{к}}$  – энтальпия начальная и конечная энтальпия воды.

Энтальпия воды рассчитывается для начальной температуры воды равной  $T_{\text{н}}=20^{\circ}\text{C}$  и конечной температуры воды, за которую принимается температура мокрого термометра равная  $T_{\text{к}}=60^{\circ}\text{C}$ . При этих температурах  $i_{\text{н}}=84$  кДж/кг, а  $i_{\text{к}}=230$  кДж/кг.

Количество тепла, отнимаемого от газа, рассчитывается как

$$Q = V_{\text{ос}} c_{\text{г}} (T_1 - T_2), \quad (4)$$

где  $V_{oc}$  – расход очищаемого газа на сухую массу;  $T_1$  - температура газа на входе в газоочистной аппарат;  $T_2$ - заданная температура газа на выходе из аппарата;  $c_r$  – изобарная теплоемкость газа ( $c_r=1,3$  кДж/кг).

Расход газа на сухую массу рассчитывается по формуле

$$V_{oc} = \frac{0,804V_r T_o P}{(0,804 + y_1)T_1 P_o} \quad , \quad (5)$$

где  $V_r$ - расход газа, поступающего в скруббер при нормальных условиях; и  $y_1$  - начальное влагосодержание;  $T_o$  – температура газа при нормальных условиях (273 °К);  $P_o$  и  $P$ – нормальное (101,3 кПа) и рабочее давление газа.

Энтальпия насыщенного пара рассчитывается по средней температуре газа в скруббере по уравнению

$$i_n = 2480 + 1,96T_{cp} \quad , \quad (6)$$

где средняя температура газа в скруббере рассчитывается по формуле

$$T_{cp} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (7)$$

В результате охлаждения газа и испарения подаваемой в скруббер воды, объем газа на выходе из аппарата отличается от первоначального. Он может быть определен как

$$V_2 = \frac{V_{oc} (0,804 + y_2)T_2}{0,804T_o} \quad (8)$$

где  $y_2$  – конечное влагосодержание, определяемое по формуле

$$y_2 = y_1 + \frac{\varphi M_g}{V_{oc}} \quad (9)$$

Необходимый рабочий объем скруббера рассчитывается как

$$V_{ck} = \frac{Q}{K_o \Delta T_{cp}} \quad (10)$$



где  $K_0$ - объемный коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T_{cp}$  - среднелогарифмическая разность температур между газом и водой в скруббере, рассчитываемая по формуле

$$\Delta T = \frac{(T_1 - T_K) - (T_2 - T_H)}{2,31g \frac{T_1 - T_K}{T_2 - T_H}} \quad (11)$$

Необходимый диаметр скруббера рассчитывается по формуле

$$D = \sqrt{\frac{4V_2}{\pi w_2}} \quad (12)$$

где  $w_2$ - скорость газа в поперечном сечении скруббера, принимаемая равной 1,5 м/с.

Оптимальное соотношение высоты и диаметра скруббера равно 2,5- 3.

#### 4. Расчетное задание

Рассчитать форсуночных (эффективность работы, диаметр, высоту, расход воды) скруббер для очистки газа от электропечи при следующих исходных данных: расход газа, поступающего на скруббер при рабочих условиях при заданном расходе и температуре газа (Таблица 1); начальное влагосодержание газа  $y_1=50$  г/м<sup>3</sup>, рабочее давление газа в скруббере  $P=110,3$  кПа, объемный коэффициент теплоотдачи  $K_0=100$ Вт/м<sup>3</sup>град; давление воды перед форсунками  $p_{ж}=4$  бар. Температуру газа на выходе  $T_2=60^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 21 Расчетные параметры

Параметр	Варианты задачи									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	2,0	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Температура газа (Т <sub>1</sub> ) °С	200	250	280	300	320	350	380	400	420	440

Параметр	Варианты задачи									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	7	7,5	8	8,5	9	9,5	5	5,5	6	6,5
Температура °С (Т <sub>1</sub> )	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640

Параметр	Варианты задачи									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Расход газа, м <sup>3</sup> /с	2,0	2,5	3	3,5	4	4,5				
Температура °С (Т <sub>1</sub> )	640	660	680	700	720	740				

**Буторина Ирина Викторовна**

**Выбор и расчет газоочистных аппаратов**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**

**Редактор ..... Технический редактор.....**

**Корректор..... Верстка, дизайн.....**

**Санитарно-эпидемиологическое заключение №**

**78.01.07.953.П001342.01.07 от 21.01.2007 г.**

**Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК**

**005-93, т. 2; 95 3005 — учебная литература**

---

**\_\_\_\_\_ Подписано в печать ..... Формат 60X84/16. ....печать. Усл.**

**печ. л. .... Тираж ..... Заказ .....**

---

**\_\_\_\_\_ Отпечатано с оригинал-макета, в Издательско-  
полиграфическом центре Политехнического университета. 195251,  
Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-**